

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760638

研究課題名（和文） 波浪場における非対称没水構造物を用いた海底近傍の物質輸送の制御

研究課題名（英文） Control of Substance Transport Near a Sea Bottom Using Submerged Asymmetrical Structures in a Wave Field

研究代表者

押川 英夫（OSHIKAWA HIDEO）

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80311851

研究成果の概要（和文）：非対称形状を有する小規模構造物を利用した底質輸送制御技術について、室内実験に基づく検討を行った。その結果、本技術の効果を数値シミュレーションにより予測する際には、構造物付近の平均的な無次元残差流速として近似的に 0.067 が利用できることが分かった。また、より詳細な残差流の予測が求められる際に有効な正の残差流が生成される範囲と残差流速の最大値を推定する評価式が併せて示された。更に、平面波浪場に非対称構造物群を設置すると、波向きによらず構造物群が設置された方向に残差流が生成されることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：A sediment transport control method with residual currents was proposed in order to cope with eroding beach and shoaling of fairways. For the practical use of the method, the relations between a residual current distribution around submerged asymmetrical structures and some dimensionless parameters were revealed by conducting two different laboratory experiments. As the results, empirical formulas were derived to calculate residual currents generated by the method in a wave field. In addition, the experiments showed that horizontal residual currents can be produced in an arbitrary direction by setting submerged asymmetrical structures with an angle.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2011年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2012年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋環境、底質輸送、波浪エネルギー、非対称構造物

1. 研究開始当初の背景

沿岸域の底質輸送に関する諸問題（海岸侵食、航路埋没、河口閉塞など）は、波浪のもつ強大なエネルギーによって深刻化することが指摘されており、そのため、他の底質輸送

制御技術では波浪エネルギーの減衰により侵食防止を図ろうとするものが多い。それに対して我々は、逆にこの波浪エネルギーを利用して、自然エネルギーのみを利用した豊かな沿岸域環境ならびに国土保全を図る新た

な底質輸送制御技術を提案している。これは、非対称な形状を有するユニット形式の小規模構造物（ブロックやパイル）を海底に複数個設置して、波浪エネルギーを利用して海底付近の物質輸送を任意に制御する技術である。

本工法は沿岸域の様々な問題に対応できる技術となっているが、シルテーションを含めて漂砂は極めて複雑な現象であるため、その制御は一般に非常に困難である。しかしながら、本工法はブロックの配置等を設置後も容易かつ自由に調節できるため、設置後の不測の事態にも柔軟に対処できる（最悪の場合には、撤去も容易に可能）。このように本手法は、沿岸域個々の特性を把握・評価しながら最適な用法を模索・学習しつつ適用していく順応的管理が可能な手法となっており、従来手法にはない柔軟性が最大の特長といえる。

2. 研究の目的

本研究開発の最終目標は、あらゆる場を対象とした底質輸送制御技術として本工法を実用化することである。しかしながら、その応用範囲は極めて広いことから、今回の助成に基づく研究開発としては「航路埋没の防止」に焦点を絞って研究を進めている。

これまでの研究により、波浪場において非対称構造物の周囲に残差流が生成されることが明らかになってきた。そこで本研究では、本技術の実用化を目指して主に二つの点に関して検討を行った。一つ目は、鉛直2次元波浪場における残差流速の予測を行うべく、系統的な室内実験により残差流の生成に寄与する無次元パラメータを明らかにして、残差流速を推定するための経験式の導出を試みた（実験A）。またブロック周りに発生する残差流に及ぼす波向きの影響について、平面波浪場を対象とした室内実験により検討を行った（実験B）。

3. 研究の方法

(1) 実験Aの方法

実験Aには図1に示す全長1900cm、幅25cm、高さ60cmの吸収式造波装置付き鉛直2次元水槽を用いた。設置する非対称構造物としては直径 D 、高さ k ($=D/2$)の半円柱型のブロックが用いられた（図2参照）。

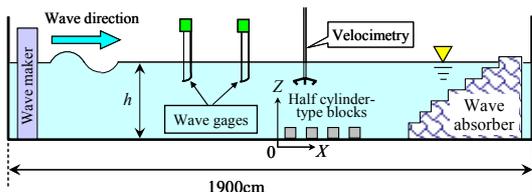


図1 実験装置の概略図



図2 半円柱型ブロックの模型

ブロックは等方格子状に配置されており、近接するブロックの中心間隔は、縦断(X)方向、横断(Y)方向ともに $2D$ である。また著者らの従来の研究により、ブロックの敷設長 l_b と波の波長 L が $l_b/L = 0.22$ の場合において底面付近に最大の残差流速が得られていることから、この結果を考慮してブロックの縦断方向の設置個数(N)を決定している。波浪およびブロックの大きさ D などについては、表1に示した条件で実験を行っている。 h は静水深、 H は規則波の波高、 T は規則波の周期である。なお本研究では、残差流生成能力に影響を及ぼす主要な無次元パラメータとして、 KC ($U_0 T/D$: U_0 はブロック高さにおける流速振幅)、相対構造物高さ (k/h)、および Re [$U_0 D/\nu$: ν ($=0.01\text{cm}^2/\text{s}$)は水の動粘性係数]の3つに着目して検討を行っている。

表1 実験Aの実験条件

| Case No. | h (cm) | H (cm) | T (s) | D (cm) | N | k/h | KC | Re |
|----------|----------|----------|---------|----------|-----|-------|------|------|
| CaseA-1 | 48.0 | 9.7 | 1.0 | 3.0 | 6 | 0.03 | 2.8 | 2500 |
| CaseA-2 | 49.0 | 4.7 | 1.8 | 3.0 | 13 | 0.03 | 5.0 | 2500 |
| CaseA-3 | 34.0 | 8.4 | 1.0 | 2.0 | 8 | 0.03 | 6.1 | 2500 |
| CaseA-4 | 33.0 | 6.2 | 1.3 | 2.0 | 11 | 0.03 | 8.1 | 2500 |
| CaseA-5 | 30.0 | 5.2 | 1.6 | 2.0 | 14 | 0.03 | 10.0 | 2500 |
| CaseA-6 | 25.0 | 7.3 | 1.1 | 1.5 | 11 | 0.03 | 12.0 | 2500 |
| CaseA-7 | 32.0 | 7.0 | 0.8 | 3.5 | 3 | 0.05 | 1.6 | 2500 |
| CaseA-8 | 32.0 | 4.5 | 1.0 | 3.5 | 4 | 0.05 | 2.0 | 2500 |
| CaseA-9 | 30.0 | 5.0 | 1.0 | 3.0 | 5 | 0.05 | 2.8 | 2500 |
| CaseA-10 | 30.0 | 3.5 | 1.5 | 3.0 | 9 | 0.05 | 4.1 | 2500 |
| CaseA-11 | 28.0 | 3.2 | 1.8 | 3.0 | 10 | 0.05 | 5.0 | 2500 |
| CaseA-12 | 19.0 | 4.6 | 1.0 | 2.0 | 7 | 0.05 | 6.1 | 2500 |
| CaseA-13 | 20.0 | 4.2 | 1.3 | 2.0 | 9 | 0.05 | 8.0 | 2500 |
| CaseA-14 | 15.0 | 5.5 | 0.9 | 1.5 | 7 | 0.05 | 10.0 | 2500 |
| CaseA-15 | 16.0 | 5.1 | 1.1 | 1.5 | 9 | 0.05 | 12.0 | 2500 |
| CaseA-16 | 25.0 | 4.7 | 0.8 | 3.5 | 3 | 0.07 | 1.6 | 2500 |
| CaseA-17 | 24.0 | 2.6 | 1.5 | 3.5 | 7 | 0.07 | 3.0 | 2500 |
| CaseA-18 | 21.0 | 2.7 | 1.8 | 3.0 | 9 | 0.07 | 5.1 | 2500 |
| CaseA-19 | 15.0 | 3.9 | 1.0 | 2.0 | 6 | 0.07 | 6.3 | 2500 |
| CaseA-20 | 14.0 | 3.3 | 1.3 | 2.0 | 8 | 0.07 | 8.0 | 2500 |
| CaseA-21 | 18.0 | 3.1 | 0.8 | 3.5 | 3 | 0.10 | 1.6 | 2500 |
| CaseA-22 | 15.0 | 2.5 | 1.1 | 3.0 | 4 | 0.10 | 3.1 | 2500 |
| CaseA-23 | 15.0 | 2.3 | 1.5 | 3.0 | 6 | 0.10 | 4.2 | 2500 |
| CaseA-24 | 15.0 | 2.2 | 1.8 | 3.0 | 8 | 0.10 | 5.0 | 2500 |
| CaseA-25 | 10.0 | 2.9 | 1.0 | 2.0 | 7 | 0.10 | 6.2 | 2500 |
| CaseA-26 | 10.0 | 2.7 | 1.3 | 2.0 | 7 | 0.10 | 8.0 | 2500 |
| CaseA-27 | 38.0 | 7.6 | 1.1 | 4.0 | 5 | 0.05 | 3.1 | 4500 |
| CaseA-28 | 40.0 | 5.5 | 1.8 | 4.0 | 9 | 0.05 | 5.1 | 4500 |
| CaseA-29 | 30.0 | 6.2 | 1.6 | 3.0 | 9 | 0.05 | 8.0 | 4500 |
| CaseA-30 | 25.0 | 4.0 | 1.1 | 5.0 | 3 | 0.10 | 2.0 | 4500 |
| CaseA-31 | 20.0 | 4.1 | 1.1 | 4.0 | 4 | 0.10 | 3.1 | 4500 |
| CaseA-32 | 15.0 | 4.6 | 1.0 | 3.0 | 4 | 0.10 | 5.0 | 4500 |
| CaseA-33 | 15.0 | 4.0 | 1.6 | 3.0 | 7 | 0.10 | 7.9 | 4500 |
| CaseA-34 | 17.0 | 2.9 | 1.1 | 5.0 | 3 | 0.15 | 2.0 | 4500 |
| CaseA-35 | 13.0 | 3.0 | 1.1 | 4.0 | 3 | 0.15 | 3.1 | 4500 |
| CaseA-36 | 13.0 | 2.7 | 1.9 | 4.0 | 6 | 0.15 | 5.3 | 4500 |
| CaseA-37 | 10.0 | 3.2 | 1.6 | 3.0 | 6 | 0.15 | 8.0 | 4500 |
| CaseA-38 | 25.0 | 6.2 | 1.1 | 5.0 | 3 | 0.10 | 3.1 | 7000 |
| CaseA-39 | 21.0 | 6.7 | 1.1 | 4.0 | 4 | 0.10 | 4.8 | 7000 |
| CaseA-40 | 21.0 | 5.6 | 1.8 | 4.0 | 7 | 0.10 | 7.9 | 7000 |

構造物設置領域付近の流速を超音波式流速計（Nortek 社製、Vectorino）により測定した。縦断方向の流速の測定断面は、構造物群の設置位置の沖側端から $D/2$ 離れた位置を原点とする左手系のデカルト座標系において、敷設長 l_B のおよそ $l_B/2$ 、 $3l_B/4$ 、 l_B の3断面とした。但し $N=3$ の場合には、先述の $3l_B/4$ を除く2断面で計測を行った。横断方向の測定断面は水路中央を $Y=0$ として、 $Y/D=0, 1$ の2断面であり（ $Y/D=1$ は横断方向に隣接するブロックの中央）、鉛直方向には水路床を $Z=0$ として $Z/k=0.067, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.67, 3.33, 4.67, 6.67, 10.0$ の11断面について測定を行った。各点毎に得られた100波分の流速の時系列データをオイラー平均することで、底質輸送制御効果の指標となる残差流速を求めた。

(2)実験Bの方法

実験Bの方法と条件については、実験Aと異なる点のみ説明する。実験は図3a)に示す全長600cm、幅400cm、高さ35cmの吸収式造波装置付き平面水槽を用いた。ブロック敷設領域の中心を原点とし、波の入射方向を X 軸、横断方向に Y 軸、鉛直上向きに Z 軸を取り（左手系）ブロックを貼り付けた薄い基板（ブロックユニット）上で計測を行った。波浪条件およびブロックの大きさ D などについては、表2に示した条件で実験を行っている。なお、ブロックの設置個数については、従横断方向ともに N で同数となっている。

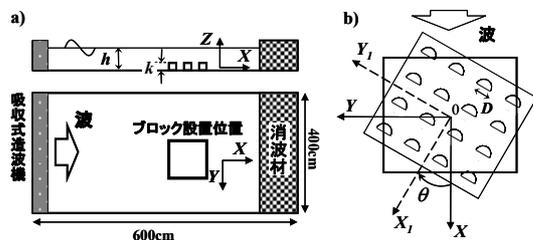


図3 実験装置の概略図 [a]装置全体の平面図、
b)ブロックユニットと座標系の定義]

表2 実験Bの実験条件

| Case No. | h (cm) | H (cm) | T (s) | D (cm) | N | k/h | KC | Re |
|----------|----------|----------|---------|----------|-----|-------|------|------|
| CaseB-1 | 23.0 | 4.2 | 1.0 | 3.0 | 6 | 0.065 | 3.0 | 2800 |
| CaseB-2 | 17.5 | 3.3 | 1.0 | 3.0 | 5 | 0.086 | 3.0 | 2800 |

波の入射方向とブロックユニットの設置角度を θ ($^\circ$) とした [図3b)参照]。実海域ではブロックが固定されるため、 θ は波向きに相当する。図3b)のようにブロックユニットを原点を中心に上から見て右回りに $\theta=0 \sim 90$ 度まで15度ずつ回転させ、角度については計7条件で実験を行った。ユニットを回転させた後の X 軸と Y 軸をそれぞれ X_1 軸、 Y_1 軸とした。鉛直方向の流速の測定位置は、

CaseB-1 で $Z/k=0.5, 1.0, 2.0$ の高さ、CaseB-2 では $Z/k=0.5$ の高さのみで計測を行った。水平面内の測定位置は CaseB-1 で6測点、CaseB-2 では固定された6測点に追加する形で θ に応じて6~20点で計測を行っている。

4. 研究成果

(1)実験Aの結果と考察

a)平均的な無次元代表残差流速の評価

まず、波浪条件に応じてブロック群により底面付近に生成される正の残差流速を簡便に評価することを試みた。すなわち、平均的な残差流速を求めるために、 X 方向の残差流速 u を同一高さの6点（ $N=3$ の場合は4点）で平均し、 U_0 によって u を無次元化した u^* を鉛直方向には底面から u^* が正の値を持つ範囲において空間平均を行うことで、無次元代表残差流速 $\langle u^* \rangle$ を求めた。結果を図4に示す。これより、 $\langle u^* \rangle$ の値には若干のばらつきが見られるものの、 KC 、 k/h 、 Re にかかわらず、およそ0.04~0.09の範囲に集中していることがわかる。したがって、条件（ここでは3つの無次元パラメータ）に因らない近似値として、それらの平均値の $\langle u^* \rangle = 0.067$ が残差流速の評価式として有用なことが分かった。

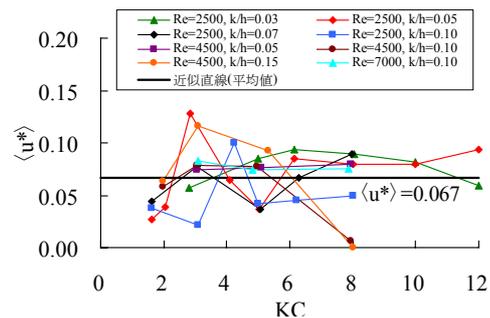


図4 KC と無次元代表残差流速 $\langle u^* \rangle$ の関係

簡単な具体的利用方法としては、ブロックの効果摩擦係数などの形で考慮して波浪場の解析を行うことで、場所ごとに波高、周期、水深が求まるため、微小振幅波理論などを用いて設置するブロックの高さに応じた流速振幅を求めれば、その6.7%が残差流速ということになる。

b)1次近似による残差流速の鉛直分布の評価

従来の研究成果などから、 X 方向の残差流速は底面付近で最大値をとり、上方に向かうにつれて次第に小さな値となることが明らかになっている。一方、前節で求めた $\langle u^* \rangle$ は u^* の正值の平均となるため、特に掃流砂に寄与するような底面近傍の残差流速値としては過小評価となる。したがって、掃流輸送に対しては残差流速の最大値が代表値として適切な可能性がある。しかしながら浮遊砂に対しては、ある程度上方の正の残差流まで

寄与することから、正の残差流の範囲もまた重要なものと考えられる。そこで、残差流速の鉛直分布の推定を可能にするため、ここでは簡便さを考慮して、残差流速が0となる鉛直座標 Z_0 をブロック高さ k で無次元化した Z_0/k と、底面付近の無次元残差流速の最大値 u^*_{max} の評価式を導出した。なお、 Re に関しては残差流に与える影響が小さかったことから、ここでは KC および k/h が X 方向残差流速に与える影響を評価している。

まず、 u^* が正値をとる範囲を示す無次元高さ Z_0/k の評価式を導出することとし、それぞれの k/h について、 KC と Z_0/k の関係を定式化した。その際、 Z_0/k は極大値を有していたことから、それぞれの k/h について以下の2次曲線による近似を行うこととした。

$$Z_0/k = A(KC)^2 + B(KC) + C \quad (1)$$

次に(1)式中の A 、 B 、 C は k/h に依存すると考えられるため、それらの係数を k/h の関数として定式化した。その結果、 KC と k/h を用いた Z_0/k の評価式が以下の式(2)のように求められた。

$$\begin{aligned} Z_0/k = & \left\{ -23(k/h)^2 + 4.0(k/h) - 0.21 \right\} (KC)^2 \\ & + \left\{ 3.0 \times 10^2 (k/h)^2 - 61(k/h) + 3.3 \right\} (KC) \\ & + \left\{ -5.8 \times 10^2 (k/h)^2 + 1.2 \times 10^2 (k/h) - 4.6 \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

式(2)の精度を検証するために、実際に行った実験条件の KC 、 k/h を代入して、実験で得られた値と推定値を比較した結果を図5に示す。多少のばらつきは見られるものの、式(2)がおおむね実験結果を再現していることが理解される。

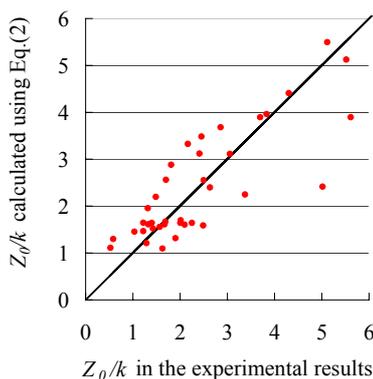


図5 Z_0/k に関する実験値と推定値の比較

なお、浮遊砂輸送量などを評価する際に、底面付近に発生する正方向の単位幅残差流量 Q^* の算定が必要な場合には、前述の $\langle u^* \rangle$ と本節の Z_0/k の評価式を用いることで、無次元単位幅残差流量が $Q^* = \langle u^* \rangle \cdot (Z_0/k)$ によって求められることになる。

次に Z_0/k の定式化と同様に u^*_{max} と KC および k/h との関係を定式化した。その結果、 u^*_{max} の評価式が以下の式(3)のように求められた。

$$\begin{aligned} u^*_{max} = & \left\{ -1.5(k/h)^2 + 0.19(k/h) - 7.1 \times 10^{-3} \right\} (KC)^2 \\ & + \left\{ 16(k/h)^2 - 2.3(k/h) + 0.11 \right\} (KC) \\ & + \left\{ -26(k/h)^2 + 4.1(k/h) - 0.067 \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

精度の検証のために、例えば式(3)に Case35 の $KC=3.1$ 、 $k/h=0.15$ を代入すると $u^*_{max}=0.23$ で、正値の平均の $\langle u^* \rangle = 0.067$ と比較して3倍程度の値となっており、条件によっては底面付近に比較的大きな残差流速が生成されることが示されている。なお、この条件の実験値は $u^*_{max} = 0.23$ であり、ほぼ一致した値が得られることがわかる。

(2) 実験Bの結果と考察

著者らの以前の研究成果により、振動流場においてブロック単体に働く残差抵抗力の方向は波向きとほぼ一致することが明らかとなっている。これは、水平方向の残差抵抗力(ベクトル)の方向と振動方向のなす角度 ϕ_F と、ブロックの迎え角 θ_F (波向きに相当) について、 $\theta_F = \phi_F$ の関係が得られたことによる。すなわち、これは波向きに因らずブロックの設置された向きに残差抵抗力が働くことを意味しており、本技術の特長の一つとなっている。そこで本研究は、このことを踏まえて X 軸に対する残差流速ベクトルの角度を ϕ とし、ブロック付近に発生する残差流速の方向についても $\theta = \phi$ となるかどうかについて、最初に検討を行った。なお、今後 $\theta = \phi$ となる ϕ の方向を意図した方向と呼ぶこととする。また以降では、過去の研究成果などを考慮して、 $z/k=1/2$ の高さの結果を用いて検討を行っている。

ブロックの設置方向 θ に応じた水平方向の残差流速ベクトルの空間分布の例を図6および図7に示す。これより、それぞれの θ において、 X_j 方向の前後のブロックに挟まれた地点では意図した方向に残差流が生成されることが理解される。更に詳細に検討するため、各点毎に得られた残差流から平均的な残差流ベクトルの方向 ϕ を求めて θ との関係プロットしたものを図8に示す。なお、図中には $\theta = \phi$ の直線が併記されている。これより、多少のばらつきは見られるものの、意図した方向を示す $\theta = \phi$ の直線にしたがっており、ブロック付近の水平方向の残差流速についても、残差抵抗力と同様の方向特性を示すことが明らかとなった。

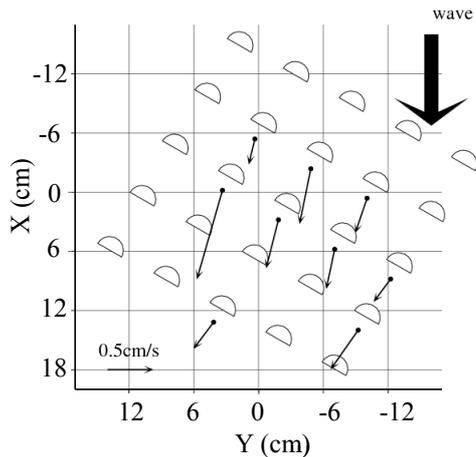


図6 ベクトル図の例1 (CaseB-2、 $\theta=30^\circ$)

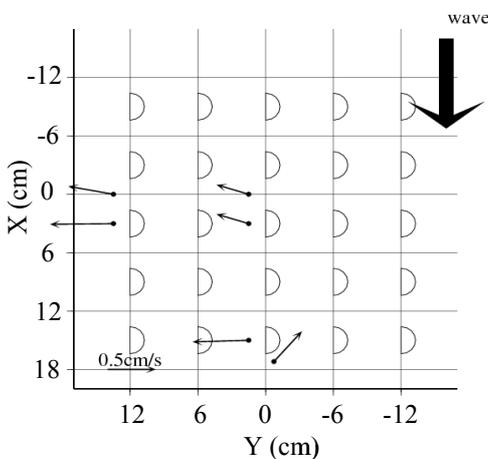


図7 ベクトル図の例2 (CaseB-2、 $\theta=90^\circ$)

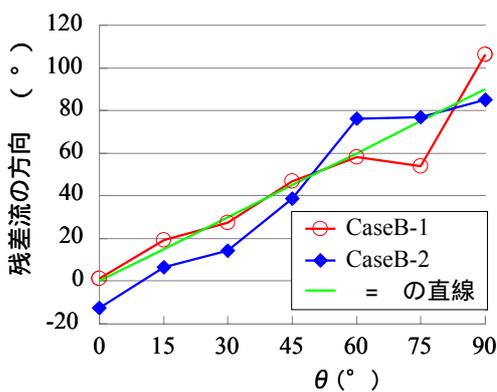


図8 θ と残差流速の方向 ϕ の関係

(3)今後の展望

本研究開発の最終的な目標は、3次元の実海域における漂砂制御であるため、今後は残差流（流れ）と漂砂量（底質移動量）の関係性について定量的に明らかにするとともに、経験式を導出することで、本技術を実海域に適用した際の将来の地形分布の評価・予測を可能にする必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

① Hideo Oshikawa, Kohei Motomura and Toshimitsu Komatsu, Quantitative Estimation of Residual Currents around Submerged Asymmetric Structures in Wave Fields, *IAHR-APD 2012 Proceedings* (USB, 11p.), 2012, 査読有.

② A. H. Azimi, J. Cai, N. Hall, H. Oshikawa, D. Z. Zhu and N. Rajaratnam, Mound Formation by Slurry Jets on a Slope in a Water Pond, *Proceedings of the 34th IAHR World Congress*, pp.3346-3353, 2011, 査読有.

押川英夫、本村航平、小松利光、波浪場における小規模非対称構造物群による残差流の定量評価、土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.67, No.2, pp.I_52-I_57、2011、査読有。

〔学会発表〕(計8件)

吉田奈津妃、波浪場における非対称没水構造物群周りの残差流に及ぼす波向きの影響、平成24年度土木学会西部支部研究発表会、2013年3月9日、熊本大学黒髪北キャンパス。

Hideo Oshikawa, Study on the Sediment Transport Control by Using Submerged Asymmetrical Structures in Wave Fields, Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory Seminar Series, 2012年9月7日、University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.

Toshimitsu Komatsu, Quantitative Estimation of Residual Currents around Submerged Asymmetric Structures in Wave Fields, 18th Congress of APD-IAHR, 2012年8月20日、ICC Jeju, Korea.

本村航平、非対称没水構造物群周りの残差流に及ぼす波向きの影響に関する研究、平成23年度土木学会西部支部研究発表会、2012年3月3日、鹿児島大学郡元キャンパス。

本村航平、非対称構造物群による残差流の定量評価、第21回九州・山口地区海岸工学者の集い、2011年8月30日、佐賀県和多屋別荘。

本村航平、波浪場における小規模非対称構造物群による残差流の定量評価、第36回海洋開発シンポジウム、2011年6月30日、愛媛県メルパルク松山。

A. H. Azimi, Mound Formation by Slurry Jets on a Slope in a Water Pond, 34th IAHR World Congress, June 27th 2011, Brisbane Convention & Exhibition Centre, Australia.

本村航平、波浪場における非対称没水構造物群周りの残差流生成特性、平成 22 年度 土木学会西部支部研究発表会、2011 年 3 月 5 日、九州工業大学戸畑キャンパス.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

押川 英夫 (OSHIKAWA HIDEO)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号 : 80311851