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

QUANTITATIVE ESTIMATION OF RESIDUAL CURRENTS AROUND PLURAL SUBMERGED ASYMMETRICAL STRUCTURES IN WAVE FIELDS

押川英夫¹・本村航平²・小松利光³

Hideo OSHIKAWA, Kohei MOTOMURA and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 博(工) 九州大学助教 大学院工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻 (同上)

³フェロー 工博 九州大学教授 大学院工学研究院環境都市部門 (同上)

Residual currents around submerged asymmetrical structures, known as *BaNK* blocks, are quantitatively estimated in wave fields. Komatsu *et al.* (2001) proposed '*BaNK* system' in order to cope with beach erosion and shoaling of fairways. The system is a method to control sediment transport using residual currents which are produced by plural submerged asymmetrical structures in a wave field. In this study, three kinds of dimensionless parameters which are the Keulegan-Carpenter number, Reynolds number and structure height relative to water depth are regarded as main dimensionless parameters for producing residual currents. Velocity distributions around half cylinder type *BaNK* blocks are measured in various wave conditions and structure heights in a wave tank. As a result of this study, the relationships between vertical residual current distributions around asymmetrical structures and the dimensionless parameters are found. Furthermore some empirical formulas are established to calculate residual currents generated by the *BaNK* system in a wave field.

Key Words : Submerged asymmetrical structures, wave field, residual current, dimensionless parameters, empirical formula, *BaNK* system

1. はじめに

砂浜は「白砂青松」という言葉もあるように美しい景観を有し、人々に安らぎとレクリエーションの場を提供している。また、漁業などの生産の場としての機能とともに、波浪を減衰させる消波機能を有し、国土と人々の生命および財産を守る重要な役割も果たしている。しかしながら、ダムや沿岸構造物の建設等により砂浜における土砂の供給と損失のバランスが崩れることで海岸侵食が各地で発生しており、地球温暖化による海面上昇の問題とも相俟って、

良好な沿岸環境の維持が危ぶまれている。したがって、効果的な侵食防止対策と砂浜の創成技術の開発が緊急を要する重要課題となっている。

このような背景の下、小松ら¹⁾は波浪エネルギーの一部を利用した有効な海岸侵食防止技術であり積極的な砂浜の創出技術でもある*BaNK* (*Beach and Navigation Keeper*)システムを提案している。*BaNK*システムとは波浪による往復流場に小規模な非対称構造物を設置して海底付近に一周期平均的な流れ(以下では波浪残差流,あるいは単に残差流と呼ぶ)を任意の方向に生成させることにより、自在な

図-1 波浪残差流の生成機構

図-2 実験装置の概略図 [左図a) : 装置全体の側面図, 右図b) : 半円柱型構造物単体の向き]

表-1 実験条件

Case No.	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10	Case11	Case12	Case13
静水深 h (cm)	48	49	34	33	30	25	32	32	30	30	28	19	20
波高 H (cm)	9.7	4.7	8.4	6.2	5.2	7.3	7.0	4.5	5.0	3.5	3.2	4.6	4.2
周期 T (sec)	1.0	1.8	1.0	1.3	1.6	1.1	0.8	1.0	1.0	1.5	1.8	1.0	1.3
ブロック直径 D (cm)	3	3	2	2	2	1.5	3.5	3.5	3	3	3	2	2
ブロック個数 N	6	13	8	11	14	11	3	4	5	9	10	7	9
k/h	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$KC (\equiv U_0 T/D)$	2.8	5.0	6.1	8.1	10.0	12.0	1.6	2.0	2.8	4.1	5.0	6.1	8.0
$Re (\equiv U_0 D/\nu)$	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500

Case No.	Case14	Case15	Case16	Case17	Case18	Case19	Case20	Case21	Case22	Case23	Case24	Case25	Case26
静水深 h (cm)	15	16	25	24	21	15	14	18	15	15	15	10	10
波高 H (cm)	5.5	5.1	4.7	2.6	2.7	3.9	3.3	3.1	2.5	2.3	2.2	2.9	2.7
周期 T (sec)	0.9	1.1	0.8	1.5	1.8	1.0	1.3	0.8	1.1	1.5	1.8	1.0	1.3
ブロック直径 D (cm)	1.5	1.5	3.5	3.5	3	2	2	3.5	3	3	3	2	2
ブロック個数 N	7	9	3	7	9	6	8	3	4	6	8	7	7
k/h	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
$KC (\equiv U_0 T/D)$	10.0	12.0	1.6	3.0	5.1	6.3	8.0	1.6	3.1	4.2	5.0	6.2	8.0
$Re (\equiv U_0 D/\nu)$	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500

Case No.	Case27	Case28	Case29	Case30	Case31	Case32	Case33	Case34	Case35	Case36	Case37	Case38	Case39	Case40
静水深 h (cm)	38	40	30	25	20	15	15	17	13	13	10	25	21	21
波高 H (cm)	7.6	5.5	6.2	4.0	4.1	4.6	4.0	2.9	3.0	2.7	3.2	6.2	6.7	5.6
周期 T (sec)	1.1	1.8	1.6	1.1	1.1	1.0	1.6	1.1	1.1	1.9	1.6	1.1	1.1	1.8
ブロック直径 D (cm)	4	4	3	5	4	3	3	5	4	4	3	5	4	4
ブロック個数 N	5	9	9	3	4	4	7	3	3	6	6	3	4	7
k/h	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.10
$KC (\equiv U_0 T/D)$	3.1	5.1	8.0	2.0	3.1	5.0	7.9	2.0	3.1	5.3	8.0	3.1	4.8	7.9
$Re (\equiv U_0 D/\nu)$	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	7000	7000	7000

底質移動の制御を可能とするものである。本システムにおける波浪残差流生成メカニズムの概念を図-1に示す。これまでの研究により、波浪場においてブロックの周囲に意図した方向の波浪残差流が生成されることが明らかになってきた^{1)~13)}。しかしながら、現在までの研究成果の蓄積だけから種々の波浪条件下において発生する残差流の大きさを予測することは困難である。そこで本研究は、残差流の定量評価を行うべく、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について検討するとともに、それらの無次元パラメータを用いて残差流を推定するための経験式の導出を試みた。

2. 実験装置および方法

実験には図-2に示す全長 1900cm, 幅 25cm, 高さ 60cm の鉛直 2 次元吸収式造波水槽を用いた。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^{2), 4)}。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従来の研究成果を考慮して、縦断(X)方向、横断(Y)方向ともに $2D$ である^{3), 13)}。また過去

の研究¹¹⁾によると、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。

水槽の岸側端部には傾斜をつけた消波材が設置されており、本研究は規則的な進行波を対象としている。波浪条件、ブロックの大きさ D およびブロックの岸沖方向の個数 N 等については表-1に示された条件下で実験を行っている。なお、表中の $\nu (=0.01\text{cm}^2/\text{s})$ は水の動粘性係数、 U_0 はブロック高さ k の地点における波運動に伴う流速振幅であり、ここでは微小振幅波理論から求められている。

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右手系のデカルト座標系において、ブロック敷設長 l_B を用いておよそ $l_B/2$, $3l_B/4$, l_B の 3 断面であり、縦断方向に設置された前後のブロックの中間の断面である。ただし $N=3$ の場合には、縦断方向のブロック敷設領域が短いために、先述の $3l_B/4$ を除く 2 断面で計測を行っている。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（ $Y/D=0$ が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．サンプリング周波数は100Hzであり，各点毎に得られた約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などを求めた．

本研究では，波浪残差流に影響を与える主要な無次元パラメータとして，表-1に示したようにKeulegan-Carpenter数¹⁴⁾ ($KC \equiv U_0 T/D$)，Reynolds数 ($Re \equiv U_0 D/\nu$)，相対構造物高さ k/h の3つを考えている．本実験の相似則を考えると， KC と相対構造物高さは実験と現地スケールで同程度となっているものの，室内実験では通常不可避であるが Re に関しては1～2オーダー程度実験の方が小さくなっている．また， $BaNK$ システムにおいては構造物を実際に設置する位置は碎波帯よりも沖側の沖浜帯を主に考えている．本研究では，実験を平坦床で行っており水深に関してもある程度の深さを確保している．つまり本研究では，構造物周りの往復流の非対称性は，主として構造物形状の非対称性に起因するとの立場で検討を行っており，消波材も設置されていることから，目視でも確認されているように非碎波の条件となっている．

3. 実験結果および考察

(1) 無次元残差流速の鉛直分布

$Re=2.5 \times 10^3$ ， $KC \approx 6.2$ （正確には $KC=6.1 \sim 6.3$ ）において k/h をパラメータとした X 方向残差流速の鉛直分布を無次元化して図-3に示す．縦軸は Z/k であり，横軸の $u^*(\equiv u/U_0)$ については各地点の X 方向残差流速 u を同一高さの6点（ $N=3$ の場合は4点）で平均し，更に U_0 によって無次元化している．これより， k/h が小さいほど u^* の最大値が大きくなっており，また正の残差流の生成厚も大きくなっていることが分かる．

図-3 無次元残差流速の鉛直分布
($KC \approx 6.2, Re=2.5 \times 10^3$)

次に $Re=2.5 \times 10^3$ ， $k/h=0.03$ において， KC をパラメータとした u^* の鉛直分布を図-3と同様に図-4に示す．これより正の残差流の最大値は $KC=5.0$ 程度，生成厚は $KC=8.1$ 程度で極大となることが分かる．条件がやや異なるものの，Rusdin *et al.*¹⁵⁾の数値計算によると $KC=8.4$ 付近で無次元残差流速が最大になると報告されており，ある程度符合した結果となっている．

図-4 無次元残差流速の鉛直分布
($k/h=0.03, Re=2.5 \times 10^3$)

$k/h=0.10$ ， $KC=3.1$ において， Re をパラメータとした u^* の鉛直分布を図-5に示す．これより， Re が大きい場合により大きな u^* が生じており，押川らによる低レイノルズ数場における半円柱型ブロック周りの数値計算結果⁸⁾と符合した結果となっている．前述のように，実海域において本システムを適用する際に想定される Re は本実験条件よりも大きくなる．したがって，実海域における u^* の値は少なくともこれらと同程度の値をとることが期待される．

図-5 無次元残差流速の鉛直分布
($k/h=0.10, KC=3.1$)

(2) 3次モーメントによる底質輸送促進効果の評価

Russel and Huntley¹⁶⁾によると流速の3次モーメントが掃流砂などの底面付近の底質輸送能力の指標となることが知られている．そこで， $Re=2.5 \times 10^3$ の場合における無次元化された X 方向流速の3次モーメント $\langle q^* \rangle$ と KC および k/h の関係を図-6に示す． $\langle q^* \rangle$ については， u^* の算出と同様に流速の3次モーメントを水平方向には同一高さの6地点， Z 方向には底面付近の $Z/k \leq 0.25$ の範囲で局所平均したものを U_0 により無次元化した． $\langle q^* \rangle$ は高次モーメントということもありややばらついているものの，全ての

条件で正值となっている。また、 KC が8~12程度と比較的大きい場合、および k/h が比較的小さい場合に $\langle q^* \rangle$ の値が大きくなっており、このような条件において特に掃流砂に対して強い底質輸送促進効果が期待できることが分かった。

図-6 KC と u の3次モーメントの関係($Re=2.5 \times 10^3$)

4. 残差流速の定量評価

今後のBaNKシステムの実用化にあたっては、実海域に本システムを適用した場合の具体的な効果の予測が必要となる。その際、非対称構造物の形状を直接的に考慮した数値モデル [例えば押川ら⁸⁾、許ら¹⁷⁾] を実海域に適用することは現実的には困難であり、波浪場の解析と組み合わせることが可能な形でBaNKシステムの効果を定量化することは非常に有用である。そこで、本実験によって得られた残差流の結果を主要な無次元パラメータを用いて再現する経験式の導出を行った。

(1) 平均的な無次元代表残差流速の評価

初めに、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-7に示す。これより、 $\langle u^* \rangle$ の値にはややばらつきが見られるものの、 KC 、相対構造物高さ、 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 $\langle u^* \rangle \approx 0.067$ が残差流速の評価式として有用なことが分かった。

簡単な具体的利用方法としては、ブロックの効果を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%が残差流ということになる。

図-7 KC と無次元代表残差流速の関係

(2) 1次近似による残差流速の鉛直分布の評価

図-3~図-5を見ても分かるように、 X 方向の残差流速は底面付近で最大値を取り、上方に向かうにつれて次第に小さな値となる。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である可能性がある。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。これより、第1次近似として直線を仮定すれば、底面付近に発生する正の残差流速の鉛直分布まで算定可能となる。

a) 正の岸沖方向残差流の高さの定式化

図-8 KC と Z_0/k の関係 ($k/h=0.10$)

まず、 u^* が正值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。一例として、 $k/h=0.10$ の場合の KC と Z_0/k の関係を図-8に示す。なお、図-5からもある程度は想像されるように、 Z_0/k に対する Re の影響は顕著ではなかったこと、また

本研究における実験では Re が小さいことなどから判断して、ここでは Re の影響は無視することとし、**図-8**では $Re=2500, 4500, 7000$ の場合を区別することなくプロットしている。これより、 $KC=5$ 程度で Z_0/k は極大値をとることがわかる。他の k/h においても同様に Z_0/k が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 についての関係式を求める。一例として、**図-9**にそれぞれの k/h に対して A の値をプロットした図を示す。これより、 A は極大値を有する曲線と見做せることから、二次曲線を用いて近似することとして以下の式(2)を求めた。また、 B, C に対しても同様な近似を行うことでそれぞれ式(3)、式(4)を求めた。

図-9 k/h と A の関係

$$A = -19(k/h)^2 + 3.3(k/h) - 0.17 \quad (2)$$

$$B = 2.6 \times 10^2 (k/h)^2 - 53(k/h) + 2.9 \quad (3)$$

$$C = -5.8 \times 10^2 (k/h)^2 + 1.1 \times 10^2 (k/h) - 4.2 \quad (4)$$

以上より、式(2)～(4)を式(1)に代入することで、 KC と k/h を用いた Z_0/k の評価式が以下の式(5)のように求まる。

$$Z_0/k = \left\{ -19(k/h)^2 + 3.3(k/h) - 0.17 \right\} (KC)^2 + \left\{ 2.6 \times 10^2 (k/h)^2 - 53(k/h) + 2.9 \right\} (KC) + \left\{ -5.8 \times 10^2 (k/h)^2 + 1.1 \times 10^2 (k/h) - 4.2 \right\} \quad (5)$$

式(5)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-10**に示す。多少のばらつきは見られるものの、式(5)がおおむね実験結果を再現していることが理解される。

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、前節の $\langle u^* \rangle$ 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。

図-10 実験値と推定値の比較

b) 無次元残差流速の最大値の定式化

Z_0/k の定式化と同様に簡便さも考慮して、ここでは u^*_{max} と KC および k/h との関係を定式化した。まず、それぞれの k/h について KC と u^*_{max} の関係を調べた。一例として、 $k/h=0.03$ における KC と u^*_{max} との関係を**図-11**に示す。これより多少のばらつきは見られるものの、**図-4**で示されたように u^*_{max} は極大値を有していることが理解される。他の k/h については同様に極大値を有するか、もしくはほぼ直線となっていたことから、それぞれの k/h について2次曲線による近似を行うこととして、以下のような関係式を得た。

$$u^*_{max} = A(KC)^2 + B(KC) + C \quad (6)$$

図-11 KC と u^*_{max} の関係 ($k/h=0.03$)

図-12 k/h と A の関係

次に(6)式中の A , B , C についての関係式を求める。一例として、図-12にそれぞれの k/h に対して A の値をプロットした図を示す。これより、 A は極大値を有する曲線と見做せることから二次曲線を用いて近似することとし、以下の式(7)を求めた。また、 B , C に対しても同様な近似を行うことでそれぞれ式(8), 式(9)を求めた。

$$A = -2.4(k/h)^2 + 0.34(k/h) - 1.1 \times 10^{-2} \quad (7)$$

$$B = 4.7(k/h)^2 - 1.4(k/h) + 8.6 \times 10^{-2} \quad (8)$$

$$C = -1.1 \times 10^2 (k/h)^2 + 16(k/h) - 0.39 \quad (9)$$

以上より、式(7)~(9)を式(6)に代入することで、 KC と k/h を用いた u^*_{max} の評価式が以下の(10)式のように求まる。

$$u^*_{max} = \left\{ -2.4(k/h)^2 + 0.34(k/h) - 1.1 \times 10^{-2} \right\} (KC)^2 + \left\{ 4.7(k/h)^2 - 1.4(k/h) + 8.6 \times 10^{-2} \right\} (KC) + \left\{ -1.1 \times 10^2 (k/h)^2 + 16(k/h) - 0.39 \right\} \quad (10)$$

精度の検証のために、例えば式(10)にCase10の $KC=4.1$, $k/h=0.05$ を代入すると $u^*_{max}=0.18$ で正值の平均の $\langle u^* \rangle = 0.067$ 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、実験値は $u^*_{max}=0.17$ であり、ほぼ一致した値が得られることがわかる。

5. おわりに

本研究により得られた主要な結果は以下の通りである。

- 1) 無次元構造物高さが小さいほど底面付近に発生する無次元残差流速が大きくなる。
- 2) $KC=5 \sim 8$ 程度で無次元残差流速が極大となる。
- 3) Re が大きいほど無次元残差流速が大きくなる。
- 4) 本システムの効果を取り入れた数値シミュレーションを行う際には、ブロック付近の平均的な無次元残差流速として近似的に $\langle u^* \rangle = 0.067$ が利用できる。
- 5) 本システムを適用する際に、正の残差流が生成される範囲と残差流の最大値を推定する評価式が求められた。

謝辞：本研究を実施するにあたり、九州大学大学院工学研究院の藤田和夫氏に多大なるご協力を頂いた。また、本研究の一部は科研費（22760638 および 20246083）の支援のもとに行われている。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小松利光, 齋田倫範, 小橋乃子, 安達貴浩, 柴田卓也：方向抵抗特性をもつ海底小規模構造物を用いた海底近傍の物質輸送の制御, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.1087-1092, 2001.
- 2) 押川英夫, 小松利光, 柴多哲郎, 深田剛教：振動流場における非対称没水構造物の方向抵抗特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.805-810, 2003.
- 3) 押川英夫, 柴多哲郎, 小松利光：非対称没水構造物による波浪残差流生成特性, 水工学論文集, 第 48 巻, No.2, pp.1255-1260, 2004.
- 4) 押川英夫, 國澤義則, 鞠承淇, 小松利光：振動流場における非対称没水構造物の抵抗特性, 海岸工学論文集, 第 51 巻 (1), pp.671-675, 2004.
- 5) Oshikawa, H., Komatsu, T. and Hashida, M.: Control of substance transport due to plural submerged asymmetrical roughness in wave fields, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, Vol. 1, pp.1017-1022, 2005.
- 6) 押川英夫, 張信一郎, 鞠承淇, 小松利光：地行浜における *BaNK* システムの現地試験, 水工学論文集, 第 49 巻, No.2, pp.1309-1314, 2005.
- 7) 押川英夫, 國澤義則, 吉田秀樹, 谷川晴一, 黒田祐一, 藤田和夫, 小松利光：非対称没水構造物を用いた航路埋没防止技術に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻 (1), pp.486-490, 2005.
- 8) 押川英夫, 小松利光：振動流場における非対称没水構造物周りの流動解析, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.817-822, 2006.
- 9) 押川英夫, 張信一郎, 井芹寧, 堀田剛広, 小松利光：閉鎖性人工海浜の変形とその制御の試み, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.905-910, 2006.
- 10) 押川英夫, 國澤義則, 沖田翔吾, 吉田秀樹, 山内洋志, 黒田祐一, 藤田和夫, 小松利光：非対称没水構造物群による海底近傍の物質輸送の制御, 海岸工学論文集, 第 53 巻 (2), pp.746-750, 2006.
- 11) 押川英夫, 武田宜紘, 吉田秀樹, 田中克己, 大波多昌志, 小松利光：波浪と流れの場における非対称没水構造物群による残差流生成特性, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.883-888, 2007.
- 12) 押川英夫, 武田宜紘, 吉田秀樹, 田中克己, 大波多昌志, Andi Rusdin, 小松利光：不規則波浪場における非対称没水構造物周りの流れ, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1417-1422, 2008.
- 13) 押川英夫, 武田宜紘, 石貫國郎, 添田宏, 中村嘉邦, 小松利光：波浪場における非対称構造物群周りの残差流, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.623-628, 2009.
- 14) Keulegan, G. H. and Carpenter, L. H.: Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, Vol.60, No.5, pp.423-440, 1958.
- 15) Rusdin, A., Oshikawa, H., Hashimoto, A. and Komatsu, T.: Numerical Simulations of Oscillatory Flows around a Submerged Asymmetrical Structure, *Proceedings of 5th International Symposium on Earth Science and Technology*, pp.189-196, 2007.
- 16) Russel, P.E. and Huntley, D.A.: A Cross-Shore Transport "Shape Function" for High Energy Beaches, *Journal of Coastal Research*, Vol.15, No.1, pp.198-205, 1999.
- 17) 許東秀, 水谷法美, 田康隆：非対称構造物に作用する揚力の発生機構とその直接数値計算法, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.736-740, 2003.