

# 長周期波対策構造物の消波における 波・流れ転化機構と平面波浪場における 消波性能評価

THE WAVE-FLOW EXCHANGE MECHANISM  
IN LONG - WAVE ABSORBING SYSTEM  
AND ITS APPLICATION IN PLANE LONG - WAVE FIELD

中嶋さやか<sup>1</sup>・関本恒浩<sup>2</sup>・西畑剛<sup>3</sup>・大島香織<sup>4</sup>

Sayaka NAKAJIMA, Tsunehiro SEKIMOTO, Takeshi NISHIHATA and Kaori OHSHIMA

- <sup>1</sup>正会員 修(農) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)  
<sup>2</sup>フェロー 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)  
<sup>3</sup>正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)  
<sup>4</sup>正会員 博(工) 五洋建設(株) (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

We have developed and investigated the long-wave absorber for several years. It is clarified that the wave absorbing mechanism of this structure is due to exchange the energy from wave to flow. In this paper, the mechanism of energy absorbing system is studied in detail by using numerical simulation of shallow water equations. It is found that main energy in the long-wave absorbing structure comes from the residual flow generated by nonlinear interaction of long-period waves. We also investigate an estimate method of the wave height distribution in plane long-wave field by introducing the effect of long-wave absorbing. The estimate method in plane long-wave field has good accuracy for not only normal incident but also oblique incident long period waves.

**Key Words :** Long-period wave, long-wave absorber, residual current, Reynolds stress, nonlinear shallow water theory, reflection coefficient

## 1. はじめに

港湾における荷役稼働率低下などの問題を背景に、長周期波対策が必要とされている。そこで著者らは、周期 30~90s 程度の波に対して有効な消波性能を有する長周期波対策構造物を開発した<sup>1)</sup>。本構造物は、図-1 に示すように 1 対の導水板と遊水室から構成される極めてシンプルな構造物であり、従来の長周期波対策構造物に比べて奥行きを必要としない省スペース型構造物であることを特徴としている。これまでの研究から、遊水室内に流入した長周期波は、構造物の形状効果を受けて 1 対の大きな循環流を形成することが明らかにされており<sup>2)</sup>、このことは波から流れへのエネルギー転化が生じていることを示している。“波”の一部が“流れ”に変化することは、すなわち反射率の低下をもたらすため、このエネルギー形態の変化が本構造物の消波効果を担っていると考えられる。そこで本研究では、数値計算を用いて波から流れエネルギーへの転化機構について検討するとともに、構造物の消波性能との関

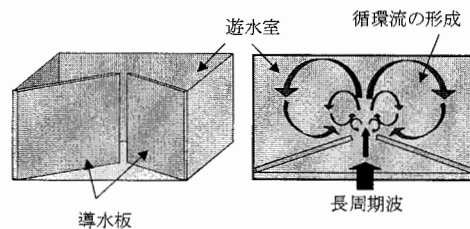


図-1 長周期波対策構造物

係について明らかにすることを試みた。

一方、長周期波対策構造物の計画にあたっては、平面波浪場における構造物の消波性能評価が必要である。大島ら<sup>3)</sup>は、水理模型実験により平面波浪場における本構造物の消波特性を明らかにするとともに、本構造物をスポンジ層でモデル化して消波効果を評価することで、ブシネスク方程式により港湾を含む広領域の長周期波を適切に評価できることを示している。しかしながら、構造物の消波性能評価も含めた平面長周期波浪場の評価については行われていない。そこで本研究では、より簡便な評価手法と

して非線形長波方程式を用い、長周期波対策構造物の消波性能も含めた平面波浪場における長周期波評価法の妥当性について検討した。

## 2. 波・流れ転化機構と消波性能との関係

### (1) 理論的背景

遊水室内部では、定常流と変動流が共存していることが確認されている。この定常流は次のように残差流と考えることができる。すなわち、 $x$ 方向の流速  $u$ 、 $y$ 方向の流速  $v$  を、それぞれ定常成分（添字  $s$ ）、変動成分（添字  $r$ ）の和として考えたうえで、鉛直平均流に関する運動方程式を時間平均すると式(1)、(2)が導かれ、長周期波成分である変動流と定常成分である残差流が生ずることが示される。なお、 $g$ は重力加速度、 $\eta$ は水位変動、 $K$ は底面摩擦係数である。

$$\left( u_r \frac{\partial u_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial u_r}{\partial y} \right) + \left( u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial u_s}{\partial y} \right) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \nabla^2 u + Ku = 0 \quad (1)$$

$$\left( u_r \frac{\partial v_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial y} \right) + \left( u_s \frac{\partial v_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial y} \right) + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \nabla^2 v + Kv = 0 \quad (2)$$

ここで式(1)、(2)の第1項はレイノルズ応力の発散項であり、残差流を駆動させる定常的な力（以降、駆動力と呼ぶ）を表す。本章では、波から流れへのエネルギー転化を捉えるために、流れ成分である残差流およびその駆動力について数値計算を用いて検討した。

### (2) 計算概要

本構造物の消波性能について、下記に示す非線形長波方程式を用いて評価を行った。 $M$ 、 $N$ はそれぞれ  $x$ 、 $y$ 方向の線流量、 $h$ は水深、 $D_x$ 、 $D_y$ はそれぞれ  $x$ 、 $y$ 方向の水平拡散項、 $F_x$ 、 $F_y$ は  $x$ 、 $y$ 方向の摩擦項である。マンングの粗度係数  $n$ は、平滑なコンクリートを想定して  $n=0.01$ とした。スリット部からの流出入に起因する拡散係数  $\varepsilon_1$  および遊水室内の水平拡散項を表す  $\varepsilon_2$ は、中嶋ら<sup>4)</sup>に基づき  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ とした。なお本手法の再現性、評価手段としての有効性は確認している<sup>4)</sup>。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - D_x + F_x = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - D_y + F_y = 0 \quad (5)$$

$$D = h + \eta \quad (6)$$

$$D_x = \varepsilon_1 \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \varepsilon_2 \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

$$D_y = \varepsilon_2 \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

$$F_x = \frac{gn^2}{D^{7/3}} (M\sqrt{M+N}) \quad (9)$$

$$F_y = \frac{gn^2}{D^{7/3}} (N\sqrt{M+N}) \quad (10)$$

計算および構造物条件は、表-1 および図-2 に示すとおりである。計算格子サイズは、中嶋ら<sup>4)</sup>に準じ、スリット開口部が3格子となるよう0.25mの正方格子とした。差分に当たってはスタガードメッシュを用い、時間差分はリーブフロッグ法、移流項は1次の風上差分を用いた。入射波は、導水板から沖に400mの地点より造波させ、造波位置は透過境界とした。また反射率の算定には、合田ら<sup>5)</sup>の入・反射波分離手法を適用した。なお、残差流速については、表-1 に示す期間中の1周期あたりの平均流速とした。

表-1 計算条件

計算領域	岸沖方向：425m 沿岸方向：30m
水深 $h$	10m
波高 $H$	0.25m
周期 $T$	30, 60, 90s
時間間隔 $\Delta t$	0.01s
計算時間	周期 30s：7min 周期 60s：9min 周期 90s：12min
残差流速 算出期間	周期 30s：造波6波目から8波分 周期 60, 90s：造波3波目から6波分

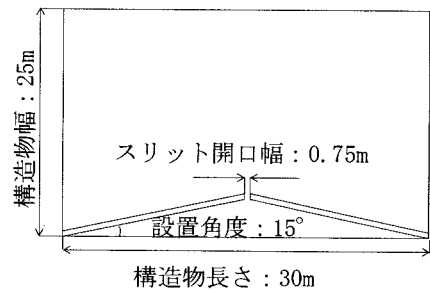


図-2 構造物条件

### (3) 計算結果

図-3に各周期における残差流速パターンを示す。各周期とも遊水室内に1対の大きな循環流が形成されているのが確認できる。周期60, 90sでは、周期30sの条件に比べて、循環流の形状がやや縦に長く、構造物の側壁に循環流の形状が強く拘束されている様子が捉えられた。導水板より沖側では、流軸両側に小さな循環流が形成されており、周期が長いほど循環流の中心は沖側に位置していた。図-4に各周期

における駆動力の分布を示す。周期が長いほど駆動力は流軸上に細く長くのびている様子がわかる。また、駆動力の絶対値をみると、遊水室内部の方が構造物沖側に比べ高かった。これは、水域の制限がない構造物沖ではレイノルズ応力の勾配（駆動力）が緩やかであるのに対し、後壁により水域が限定される遊水室ではより勾配が付きやすいためである。

図-5には、遊水室内全域を対象とした駆動力絶対値の総和を示す。駆動力は周期特性を示し、周期が長いほど駆動力は減少する傾向があった。特に周期90sでは、周期60sの33%程度まで減少していた。駆動力の分布とその総和から、短い周期の条件では駆動力が大きいためシアーが大きく、そのためスリット開口部の比較的近くで発散場となっていると考えられる。一方、周期の長い条件では、後述するように運動エネルギーが小さいため、駆動力は流軸上で引き伸ばされたような分布を形成すると考えられる。

#### (4) 遊水室内のエネルギー-周期特性に関する考察

遊水室内のエネルギーは、変動エネルギー  $E_v$  と残差エネルギー  $E_s$  で表される運動エネルギーと水位変動に伴う位置エネルギー  $E_\eta$  の和で表される。ここで、 $\rho$  は水の密度、 $A$  は遊水室の面積である。

$$E_v = \frac{1}{2h} \rho A (M_T^2 + N_T^2) \quad (11)$$

$$E_s = \frac{1}{2h} \rho A (M_S^2 + N_S^2) \quad (12)$$

$$E_\eta = \frac{1}{2} \rho g A \eta^2 \quad (13)$$

図-6 に遊水室内における単位面積当たりの各エネルギー成分を示す。位置エネルギーと残差エネルギーでは周期特性がみられ、周期が長いほど、遊水室内の総エネルギーに占める位置エネルギーの比率は高く、反対に残差エネルギーの比率は減少していた。変動エネルギーでは、明確な周期特性は見られず、周期依存性はないと考えられる。次に遊水室内の総エネルギーに注目すると、周期60sで最も高く、次いで30s、90sの順に低くなっていた。

以上の結果を踏まえ、本構造物における各エネルギーの周期特性について模式的に表したものが図-7である。一般に、長い周期の波ほどスリット部を透過しやすいため、位置エネルギーは高くなる(図-7①)。一方、周期が長ければ導水板前背面の水位差はつきにくくなるため運動エネルギーは減少し、これは図-7②・③のように表すことができる。遊水室内の総エネルギーは、位置エネルギーと運動エネルギーの和であることから、図-7①～③を足し合わせた図-7④のような傾向を示すと考えられる。したがって、周期60sにおける遊水室内の総エネルギーが周期30、90sに比べ高かった理由としては、位置および残差エネルギーともに高いエネルギーを保有

できる条件であったためと考えられる。

#### (5) 反射率についての考察

柳<sup>6)</sup>によれば、潮汐残差流は、湾開口部や岬付近で発生した潮流の剥離によって形成される潮流渦度

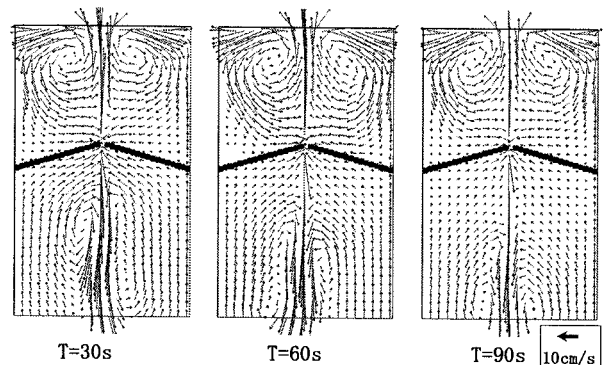


図-3 構造物周辺の各周期における残差流速パターン

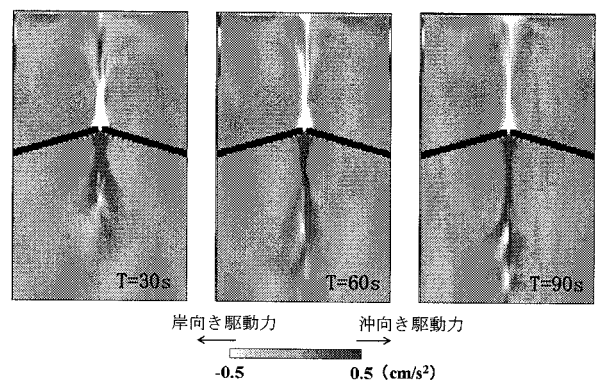


図-4 各周期における駆動力の平面分布

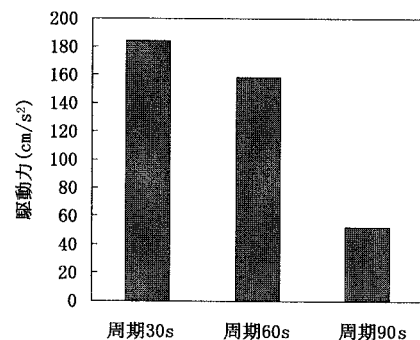


図-5 遊水室内全域の駆動力絶対値の総和

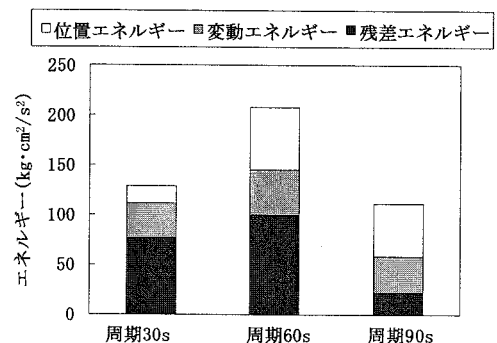


図-6 遊水室内における単位面積当たりのエネルギー

によって発生し、これが残差流自身の移流によって再配分されたのち粘性によって散逸する。ここでは、この考え方を狭い遊水室を有する構造物に適用し、反射率について考える。すなわち、潮流を長周期波と置き換えれば、潮汐残差流はここでいう長周期波に伴う残差流であり、潮流渦度は残差流の駆動力と表現することができる。また、スリットによって生じた渦がもたらすエネルギー散逸は、長周期波のエネルギーに比べて非常に小さいため支配的ではなく、むしろ残差流による摩擦損失が支配的と考えられる。このことは、スリットケーソンなどにおいて長周期波の消波が難しいことから分かる。また式(4)、(5)において、乱流モデルの導入が不要であることもこの理由による。以上のことをふまえて、反射率について次のようなモデルを考える。

まず、長周期波浪場を入射波成分と反射波成分に分け、反射波は遊水室後壁から折り返した水路内を伝播すると考えれば、図-8のように遊水室後壁から水路を展開して表すことができる。入射エネルギーを  $E_I$ 、残差エネルギーを  $E_S$  とし、後壁から反射する成分を図-8の後壁背後へ透過する透過波エネルギー  $E_T$  とみなすと、次のような関係式が成り立つ。

$$E_I = E_S + E_T \quad (14)$$

遊水室内部で捕捉された残差エネルギーは、次の入射波が到来するまでのわずか1周期間でそのエネルギー全てが散逸されるとは限らない。つまり遊水室内部では、長周期波の流入によって捕捉された残差エネルギー  $E_S$  と、それまでに捕捉され残存している残差エネルギー  $E_{ST}$  成分が共存していると考えることができる。したがって、残差エネルギー  $E_S$  は、遊水室内全残差流成分  $E_{SS}$  から残存成分  $E_{ST}$  を差し引いたものとして表す。

$$E_S = E_{SS} - E_{ST} \quad (15)$$

ここでトラップ率を  $\alpha$  とすると、

$$E_S = (1 - \alpha)E_{SS} \quad (16)$$

再びスリット部を通り沖へと伝播する反射波は、スリット部を通過する際に新たな残差成分  $E'_S$  を発生させるため、最終的に沖へ向かう反射波エネルギー  $E_R$  は次式となる。

$$E_R = E_T - E'_S \quad (17)$$

ここで、 $E'_S$  が  $E_S$  に比例すると考える。ただし前述のように構造物沖では、水域が限定されている遊水室内と比べて駆動力は小さい。したがって、ス

リット部流出時に発生した残差エネルギー  $E'_S$  は比例係数  $\beta$  を用い、次のようにあらわすことができる。

$$E'_S = \beta E_S \quad (18)$$

したがって、反射率  $K_R$  は

$$K_R = \sqrt{1 - (1 + \beta)(1 - \alpha) \frac{E_{SS}}{E_I}} \quad (19)$$

と表すことができる。

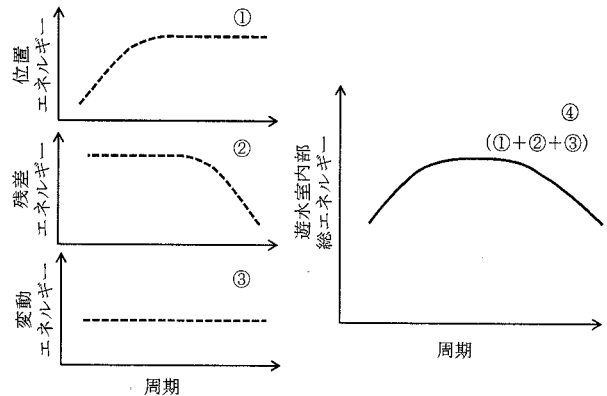


図-7 遊水室内部エネルギーの周期特性模式図

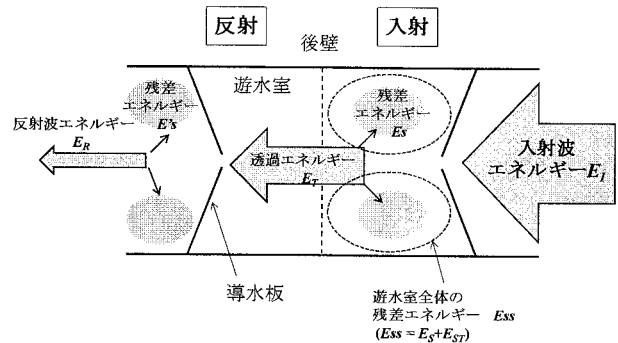


図-8 エネルギー損失モデル

実験の反射率を再現するためには、 $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 0.3 \sim 0.5$  程度となる。図-9 に、計算および水理模型実験より求められた反射率<sup>4)</sup>とエネルギー成分比より求められた反射率を示す。

エネルギー比より算出した反射率は、概ね実測値を再現できていることから、本構造物の消波機構としては、波から流れエネルギーによる転化が大きく寄与していると考えられる。入射波周期によって  $\beta$  値が変化するのは、入射時と反射時に残差流として捕捉されるエネルギー量が異なるためである。水域が限定された遊水室内では、入射波周期によってレイノルズ応力の勾配（駆動力）は大きく変化するが、構造物沖では前述のように非制限水域であるため、周期による駆動力の変化は小さい。短い周期の条件において  $\beta$  が小さくなる傾向がみられたのは、運動エネルギーが大きい分、駆動力差が顕著になるためである。

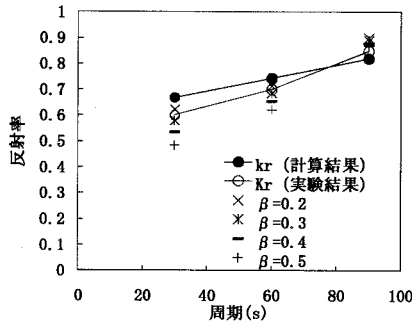


図-9 実験および数値計算より算出した反射率<sup>4)</sup>とエネルギー成分比による反射率

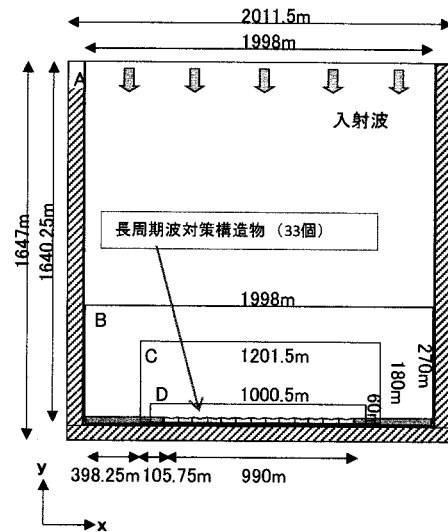


図-10 計算領域 (直角入射)

### 3. 非線形長波方程式による平面長周期波場の評価

中嶋ら<sup>4)</sup>は、非線形長波方程式を用いた数値計算により、本構造物の消波性能を比較的精度よく評価できることを明らかにしている。そこで、式(3)～(10)に示した非線形長波方程式を用いて港湾を含む大領域から構造物を詳細に表現する小領域までを多段階でネスティングすることにより、構造物の消波性能も含めた港湾内の長周期波の評価手法を検討する。なお、ここでは大島ら<sup>3)</sup>の実験データを用いて数値解析の検証を行った。

直角入射の場合の計算領域を図-10に示す。ここでは最も大きなA領域から最も小さいD領域までの4段階のネスティングを行い、メッシュサイズの最も小さいD領域においては、33基の長周期波対策構造物を詳細に表現した。このとき、スリット開口部の格子数が3となるように0.25m格子とし、遊水室内部に構造物1基当たり10608格子を配置した。また、入射角30°のケースについてはA領域を左側に1068.75m広げ、構造物位置において波のエネルギーの欠損が生じないようにした。なお、各領域の計算格子サイズ、計算領域の長さ、格子数および計算時間間隔等の計算条件を表-2に示す。

図-11は波高低減率として護岸を直立壁としたときの護岸前面における波高値に対する消波構造物を設置したときの波高値の比と定義し、その分布について計算結果と実験結果とを比較したものである。周期30sのケースでは、計算結果は実験結果よりやや大きめとなったが、その他のケースについては概ね実験結果を再現しており、本手法の妥当性が確認できた。なお、周期30sのケースで計算結果がやや大きくなったのは、計算負荷を考慮しネスティングの接続領域を構造物に近づけたため、接続位置が重複波の節の位置となり、接続部で早い流速が生じたことによると考えられる。つぎに、直角入射に対する長周期波対策構造物内部の仕切り板の影響について調べた。図-12は構造物周辺の流況について仕切り板のある場合とない場合を比較したものである。

表-2 計算条件 (直角入射)

波高 (m)	0.25			
周期 (s)	30, 60, 90			
水深 (m)	10			
入射角 (°)	0(直角入射), 30(時計回り)			
領域名	A	B	C	D
格子長 (m)	6.75	2.25	0.75	0.25
横方向長 (m)	2011.5	1998.0	1201.5	1000.5
縦方向長 (m)	1647.0	270.0	180.0	60.0
横格子数	298	889	1603	4003
縦格子数	244	121	241	241
$\Delta t$ (s)	0.135	0.045	0.015	0.005

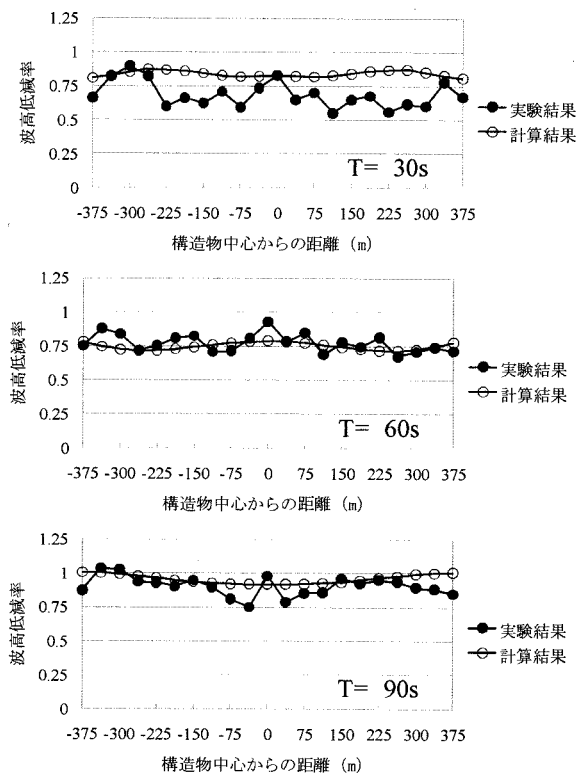


図-11 堤体前面の波高比 (直角入射)

大島ら<sup>2)</sup>が指摘するように、直角入射の場合仕切り板の有無にかかわらず、構造物周辺の流況はほぼ同様であり、ここでは詳細は示していないが護岸前面の波高比についてもほとんど両者に差は見られなかった。

図-13は、入射角 $30^\circ$ の場合について、遊水室内の仕切り板がない条件に対して波高低減率を求めたものである。周期30sおよび周期90sの場合については、直角入射の場合に比べ波高低減率はやや小さく、周

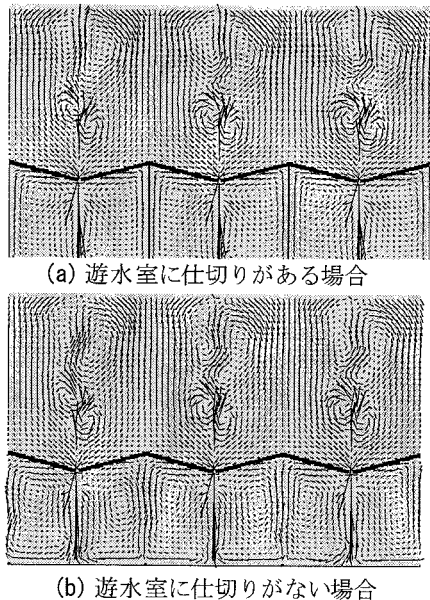


図-12 遊水室内に仕切りがある場合とない場合の流速パターンの比較 (直角入射,  $T=60s$ )

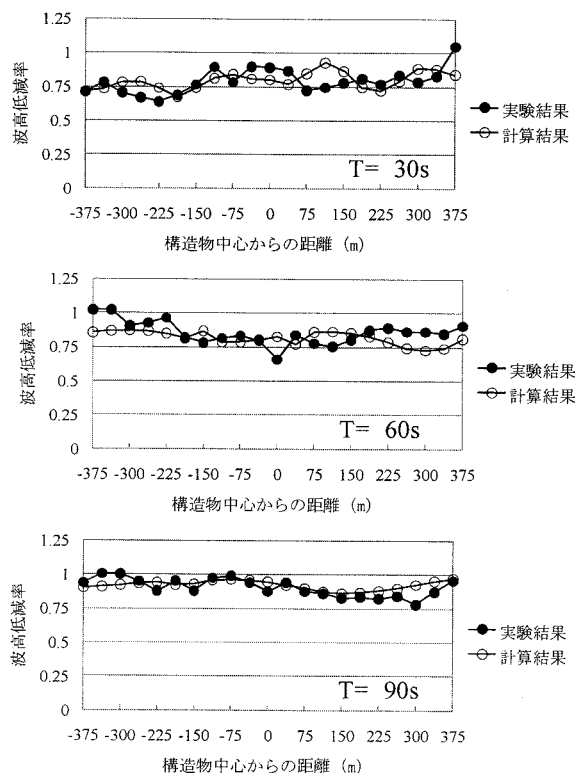


図-13 堤体前面の波高比 ( $30^\circ$  入射)

期60sでは直角入射の場合に比べてやや波高が大きくなった。なお、大島らによる実験との対応は比較的良く、本手法が斜め入射に対しても有効であることが確認できた。

本手法は、長周期波対策構造物の消波特性も含めて検討できるため、消波特性をモデル化し試行錯誤する必要がなく実務的に非常に有用と考えられる。

#### 4. おわりに

非線形長波方程式を用いて、長周期波対策構造物における波・流れ転化機構について詳細に検討した。その結果、遊水室内外において流れ成分である残差流、および残差流を形成させる駆動力を確認した。また、遊水室内のエネルギー成分について詳細に検討した結果、入射波エネルギーと遊水室内における残差エネルギーから、本構造物の反射率を概ね評価することができた。このことから、①長周期波の一部が残差流として流れに転化し、②残差流の摩擦によるエネルギー損失が長周期波のエネルギー散逸をもたらすことが本構造物の消波機構であることを明らかにした。加えて、“流れへのエネルギー転化”が主たる消波機構であるということが、エネルギーの大きい“長周期波”に対する高い消波性能を可能にしていることを示した。

また、非線形長波方程式を用いて長周期波対策構造物を含む平面波浪場評価を行った。本手法を既往の水理模型実験結果と比較したところ、本手法によって比較的精度よく長周期波の消波性能を含む波浪場評価が可能となることが明らかとなった。したがって、本手法によって港湾を含む波浪場評価が可能であり、今後の実務への応用に有効と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 大島香織, 森屋陽一, 水流正人, 杉田繁樹, 平石哲也: 渦による消波機能を活用した長周期波対策施設の特性, 海洋開発論文集, Vol.22, pp.145-150, 2006.
- 2) 大島香織, 森屋陽一, 大塚淳一, 渡部靖憲: 導水板構造物のエネルギー低減機構について, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.796-800, 2007.
- 3) 大島香織, 森屋陽一, 水流正人, 杉田繁樹, 平石哲也: 導水板を用いた長周期波対策構造物の平面波浪場における水理特性について, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.411-416, 2008.
- 4) 中嶋さやか, 大島香織, 安野浩一朗, 水流正人, 杉田繁樹, 西畑剛, 関本恒浩, 平石哲也: 長周期波対策構造物の高度化に関する研究, 土木学会論文集 B2, Vol. B2-56, No. 1, pp.236-240, 2009.
- 5) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, pp.24, 1976.
- 6) 柳哲雄: 沿岸海洋学 (第2版), 恒星社, 厚生閣, pp.42-47, 2001.