

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1385**      June 2021

波力発電浮消波堤による波浪低減効果に関する基礎的検討

米山 治男  
加島 寛章

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 研究内容 .....	4
3. 波力発電浮消波堤の基本コンセプト .....	4
3.1 浮体式波力発電装置 .....	4
3.2 浮消波堤 .....	5
3.3 基本コンセプト .....	5
4. 波浪低減効果の評価方法 .....	6
4.1 検討の流れ .....	6
4.2 浮体動揺計算 .....	6
4.3 計算条件 .....	8
5. 計算結果および考察 .....	11
5.1 概要 .....	11
5.2 係留方式の波浪低減効果への影響 .....	12
5.3 波力発電装置の波浪低減効果（浮体幅の影響） .....	15
5.4 波力発電装置の波浪低減効果（浮体喫水の影響） .....	19
5.5 波力発電装置の波浪低減効果（浮体長さの影響） .....	23
6. 結論 .....	27
7. おわりに .....	27
参考文献 .....	28
記号表 .....	28

# **Fundamental Study on Wave Reduction Effects by a Wave Power Generating Floating Breakwater**

**Haruo YONEYAMA\***  
**Hiroaki KASHIMA\*\***

## **Synopsis**

In this study, we proposed a “wave power generating floating breakwater” as a floating breakwater equipped with oscillating water column type wave energy converters. We also carried out the simulation of oscillation for a floating body based on the three-dimensional potential connection method. By using the simulation results, we verified the wave reduction effects in the sea area behind the floating breakwater due to the wave energy absorption of wave energy converters.

The main conclusions of this study are as follows:

- 1) Considering from the average wave height within a certain range of the sea area behind the wave power generating floating breakwater, it has the large wave reduction effects when the incident wave period is short, when the mooring method is stiff and when the wave energy absorption rate of wave energy converters is high as an overall tendency.
- 2) The wave power generating floating breakwater cannot achieve the sufficient wave reduction in the sea area behind it unless the wave energy absorption rate is considerably higher than 75%.
- 3) The motion characteristics of the wave power generating floating breakwater vary and the diffraction waves around it also change depending on the shape of the floating breakwater and the configuration of the mooring method. However, within the range of the shape of the target floating breakwaters, the influence of the width, draft and length of them on the average wave height in the sea area is not so large.

**Key Words:** floating breakwater, wave power generation, wave energy, wave reduction, simulation of oscillation

---

\* Director, Coastal and Ocean Engineering Department

\*\* Senior Researcher, Coastal and Ocean Development Group, Coastal and Ocean Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Port and Airport Research Institute (PARI)  
Phone : +81-46-844-5114 e-mail: yoneyama@p.mpat.go.jp

# 波力発電浮消波堤による波浪低減効果に関する基礎的検討

米山 治男\*・加島 寛章\*\*

## 要 旨

本研究では、振動水柱型波力発電装置を搭載した浮消波堤として「波力発電浮消波堤」を提案し、波力発電装置の波エネルギー吸収による浮消波堤の背後海域における波浪低減効果について、3次元ポテンシャル接続法に基づく浮体動揺計算により検証した。

本研究の主な結論は、以下の通りである。

- 1) 波力発電浮消波堤の背後海域の一定範囲における平均波高から、全体的傾向として、入射波の波周期が短い場合、剛な係留方式の場合、また波力発電装置の波エネルギー吸収率が高い場合に浮消波堤の波浪低減効果が大きいことを確認した。
- 2) 波力発電装置による波エネルギー吸収率が75%よりもかなり高くないと、浮消波堤の背後海域において十分な波浪低減が見込めないことがわかった。
- 3) 波力発電浮消波堤の形状や係留方式の構成によって、その動揺特性やその周囲の回折波が変化するが、対象とした浮消波堤の形状の範囲では、幅、喫水および長さが背後海域の平均波高に与える影響はあまり大きくないことが判明した。

キーワード：浮消波堤，波力発電，波エネルギー，波浪低減，動揺計算

---

\* 海洋研究領域長

\*\* 海洋研究領域 海洋利用研究グループ 主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5114 e-mail: yoneyama@p.mpat.go.jp

## 1. はじめに

波エネルギーを利用した浮体式波力発電装置は現在まで数多くの方式が提案されており、国内外において実証的研究が行われてきている(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2014; 永田, 2015). 一方, 漁港においては, 港内静穏度を確保するために, 遊水部などの消波機能を有する浮消波堤が利用されているいくつかの事例がある(長野ら, 1991; 高木, 1996; 荒見ら, 2006). 波力発電装置は波エネルギーを吸収して発電するため, 浮消波堤の消波機能の代わりに波力発電装置を用いることで, 波浪の低減効果を期待できる可能性がある.

浮体式波力発電装置は, 発電方式としていくつかの種類があるが, 我が国で精力的に研究開発が進められてきた振動水柱型(鈴木, 2015)のものとしては, 海明やマイティーホール(鷲尾, 1999; 鷲尾ら, 2000)などが有名である. また, 浮消波堤については, 港湾ではほぼ利用されておらず, 漁港において用いられている場合が多い(長野ら, 1991; 門野, 1992; 高木ら, 2005). 浮体式波力発電装置に関しては発電効率の観点からの研究(例えば, 居駒ら, 2013; 永田, 2015), また浮消波堤に関しては消波効率の観点からの研究(例えば, 爲廣ら, 1977; 池上ら, 1994)がこれまで多くなされてきている. しかしながら, 浮消波堤の背後海域における平面的な波浪低減効果について, 波力発電装置による波エネルギー吸収に着目して検討した事例はほとんど見当たらない.

そこで, 本研究では, 振動水柱型波力発電装置を搭載した浮消波堤として「波力発電浮消波堤」を提案し, 波力発電装置の波エネルギー吸収による浮消波堤の背後海域における波浪低減効果について, 浮体動揺計算により検証することを目的とした.

## 2. 研究内容

本研究では, 波力発電装置を搭載した浮消波堤による波浪状況を計算するために, 3次元ポテンシャル接続法に基づく周波数領域での浮体動揺計算法(井島, 1974; 上田ら, 1980)を採用した. この計算法を応用することで, 振動水柱型の波力発電装置による波エネルギー吸収を考慮した上で, 入射波に加えて, 浮消波堤周りにおける回折波や浮消波堤の動揺から発生する発散波による波浪状況を計算することができる.

浮消波堤のような浮体構造物は, 幅・喫水・長さなどの浮体諸元や係留索の種類・本数・配置などの係留方式が, その動揺特性に大きく影響を与えることがよく知られて

いる. また, 浮消波堤は, 1基の単数浮体として使用されることはなく, 背後海域の静穏度を確保するために通常は3基~6基程度の複数浮体として用いられる(例えば, 高木ら, 2005). これらのことから, 波力発電装置の波エネルギー吸収による波浪低減効果について検討する際には, 波力発電浮消波堤の諸元や係留方式等との組み合わせも考慮する必要がある.

本研究では, まず, 浮消波堤および浮体式波力発電装置の事例を示した上で, 浮消波堤に波力発電装置を搭載した波力発電浮消波堤の基本コンセプトを提示する. 次に, 波力発電浮消波堤の浮体諸元および係留方式等に関する計算条件を設定した後に, 各種計算条件に対して3次元ポテンシャル接続法に基づく周波数領域での浮体動揺計算を実施する. そして, 得られた計算結果から, 浮消波堤の形状や係留方式, また波力発電装置による波エネルギー吸収の波浪低減効果への影響について考察する.

## 3. 波力発電浮消波堤の基本コンセプト

### 3.1 浮体式波力発電装置

#### (1) 波力発電

波力発電は, 海洋再生可能エネルギーを利用した発電方法の一つであり, 海洋上の波浪が有する波エネルギーを電力に変換するものである(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2014). 波力発電を行う機構を内蔵した波力発電装置は, 発電を行う地点の水深などの環境条件により, 沿岸または海底に設置する固定式と海面上に浮かべる浮体式に分類される. 一般に沖合のほうが波エネルギーは大きくなるため, 波力発電には都合がよいが, 浮体式波力発電装置は, 固定式と異なり, チェーンやワイヤ等により係留して位置を保持する必要がある.

#### (2) 発電方式

波力発電装置は, その基本的な発電の考え方から, 振動水柱型, 可動物体型および越波型に大別することができる(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2014; 永田, 2015). 振動水柱型は, 装置の内部に空気室を設け, その中の海面の上下動により発生する空気の振動流を用いて, 空気タービンを回転させて発電する方式である. 可動物体型は, 波によって運動する物体から運動エネルギーを取り出し, 油圧装置等を通じて発電する方式である. また, 越波型は, 装置上部の水面付近に設けた傾斜板等によって越波させ貯水槽に溜めた海水を用いて, 水車を回転させて発電する方式である.

#### (3) 浮体式波力発電装置

浮体式波力発電装置は, 現在まで数多く提案されてお



図-3.1 浮体式波力発電装置（振動水柱型）

り、国内外を問わず、多くの実証的研究が行われてきているが、いまだ本格的な商用発電には至っていない（新エネルギー・産業技術総合開発機構，2014）。図-3.1は、振動水柱型の浮体式波力発電装置の一例（鷲尾ら，2000）を示す。これは、海洋科学技術センター（現 海洋研究開発機構（JAMSTEC））が開発したマイティーホエールという名称の浮体式波力発電装置であり、1998年～2002年に三重県五ヶ所湾沖にて実証実験が行われている。この装置では、振動水柱型の発電方式として内部の空気室に海水が入り出ることができるように、浮体前面の水面下に開口部を有している。

#### (4) 波力発電装置の選定

浮体式波力発電装置の発電方式の中で、振動水柱型は、可動物体型のように浮体本体に機械的な構造を装備する必要がなく構造強度上有利であり、越波型のように波を集約させるための浮体の大型化が必要なく小規模化が可能である。これらの特徴は、波力発電装置を浮消波堤と組み合わせる際にも重要な利点であるため、波力発電浮消波堤の発電方式として振動水柱型を採用することとした。

### 3.2 浮消波堤

#### (1) 特徴

浮消波堤は、背後の静穏な海域を確保するために、港湾や漁港において用いられている浮体式の防波堤である。浮消波堤は、チェーン等により係留されて水面上に浮遊する浮体構造物であり、波の作用に対して動揺し浮消波堤自身が波を発生させることから、通常の固定式の防波堤のように完全に波を遮蔽できるわけではない。特に、波長の長い波を透過してしまう特徴があるため、浮消波堤は、うねりなどの周期の長い波の侵入がある外洋に面した海域で用いられることは少なく、島嶼内や半島内などのある程度遮蔽された狭い海域で採用されていることが多い。また、生け簀などの養殖施設を波浪から守るために、水深が深い場所でも設置可能で海水交換を妨げないといった利点を有する浮消波堤がよく採用されている。



図-3.2 浮消波堤（共鳴方式）

#### (2) 消波方式

浮消波堤は、その消波方式によって、反射方式、砕波方式および共鳴方式に分類される（長野ら，1991）。反射方式は、浮消波堤の基本形状である矩形浮体の前面壁および側壁からの反射作用による消波効果を主体に、浮体動揺の位相差・摩擦などの複合的な作用により消波する方式である。砕波方式は、水面付近に設置した傾斜板・格子状浮体により波を強制的に砕波・消散させて消波する方式である。また、共鳴方式は、反射方式の消波原理を改良・発展させたものであり、浮体遊水部の水の動きを利用して浮体の動揺や浮体が造り出す発散波を制御し、入射波と干渉させて消波する方式である。図-3.2は、最も技術開発がなされた共鳴方式の浮消波堤の一例（荒見ら，2006）を示す。これは、内部水流振動型と呼ばれている浮消波堤であり、浮体内部の複雑な遊水部の水流の動きによって入射波と浮体動揺との位相差を発生させて消波を行う方式である。

#### (3) 浮消波堤の選定

浮消波堤の消波方式の中で、浮体内部に遊水部を有する共鳴方式は、装置内部に空気室を有する振動水柱型波力発電装置と内部構造を一体化できるため、浮消波堤の上部に振動水柱型の波力発電装置を搭載する波力発電浮消波堤のコンセプトに合致した方式である。

### 3.3 基本コンセプト

#### (1) 目的

波力発電装置を搭載した浮消波堤である波力発電浮消波堤は、波力発電装置による波エネルギーの吸収によって浮消波堤による消波効果を実現し、背後海域の静穏度の向上を図るものである。波力発電浮消波堤では、従来の浮消波堤の主目的である消波効果に加えて、波力発電装置によって発電された電力の周辺地域への供給により、浮消波堤に新たな付加価値を生み出すことができる。また、波力発電装置においても、浮消波堤と組み合わせることで背後海域の静穏度向上という付加価値が得られ、そ

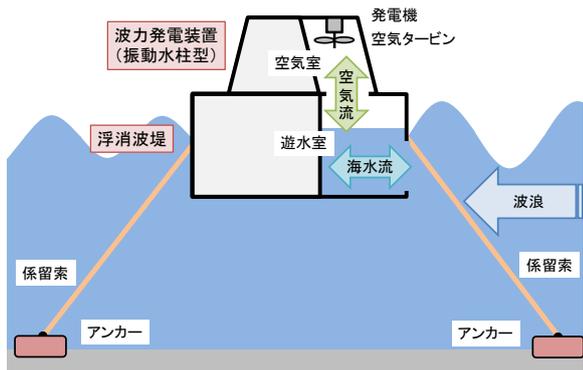


図-3.3 波力発電浮消波堤の基本コンセプト

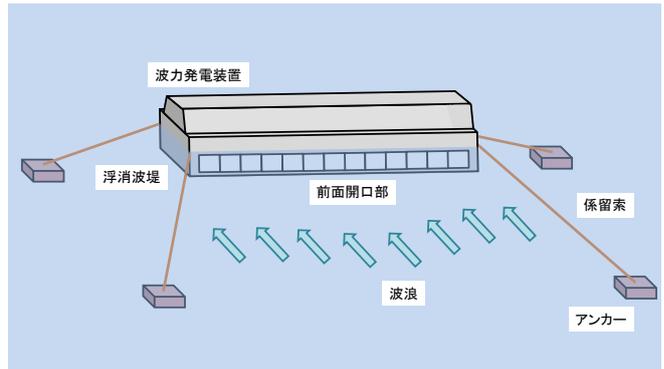


図-3.4 波力発電浮消波堤のイメージ (3D)

の費用対効果 (B/C) を増加させることができる。再生可能エネルギー利用発電の推進が求められている昨今では、波力発電浮消波堤は、波力発電の普及といった観点からも大きな可能性があると言える。

#### (2) 基本コンセプト

波力発電浮消波堤は、共鳴方式の浮消波堤に振動水柱型の波力発電装置が搭載された構造とした。図-3.3 は、波力発電浮消波堤の基本コンセプトを断面図として示したものである。また、図-3.4 は、波力発電浮消波堤の3次元イメージを示している。波力発電浮消波堤は、浮消波堤を矩形形状とし、その内部の遊水部を空気室として利用して、上部に振動水柱型波力発電装置を搭載した構造である。浮消波堤の諸元は、過去の施工事例(長野ら, 1991; 門野, 1992; 高木, 1996; 高木ら, 2005; 荒見ら, 2006)を参考にして、長さ 50m、幅 10m および喫水 5m と設定し、実際に利用される際には浮消波堤は複数基で構成されるものとした。浮消波堤の前面の水面下には、マイティーホエールと同様に開口部があり、内部の空気室に海水が入り出ることができるようになっている。発電機構は、振動水柱型の波力発電装置そのものであるが、本研究では、発電機の定格出力や発電装置全体の発電効率等に関する基本コンセプトは設定していない。これは、波力発電装置の規模や仕様は、対象海域の波浪状況や浮消波堤の諸元や係留方式等の詳細な条件を確定しないと決定することが難しいからである。一方、本研究では、波力発電装置による波エネルギーの吸収に焦点を当てて、波力発電装置の入射波に対する波エネルギー吸収率の違いが、浮消波堤の波浪低減効果に与える影響を中心に検討をしている。

なお、波力発電装置の波エネルギー吸収率は、同装置の発電効率(厳密には、波エネルギーから空気流エネルギーへの一次変換効率)と概ね同義として使用できる。よって、有効な波浪低減効果を発揮するために必要となる波力発電装置の波エネルギー吸収率から発電効率を換算し、波力発電装置の規模や仕様を推定することは可能である。

## 4. 波浪低減効果の評価方法

### 4.1 検討の流れ

波力発電浮消波堤による波浪低減効果を評価するために、波力発電装置による波エネルギー吸収を考慮した3次元ポテンシャル接続法に基づく周波数領域での浮体動揺計算を実施する。

まず、波力発電浮消波堤の浮体諸元および係留方式等に関する計算条件を設定する。波力発電浮消波堤の基本的な諸元および構成は、長さ 50m×幅 10m×喫水 5m×複数基であるが、波浪低減効果への影響を相互比較するために、この諸元や構成をいくつか変化した浮体条件とする。また、浮消波堤のような浮体構造物は、その動揺特性に与える係留方式の影響が大きいことから、対象とする浮消波堤に対して係留方式をいくつか変えた係留条件とする。波力発電装置による波エネルギー吸収については、浮消波堤の前面の波反射率を変化させることにより、開口部から吸収される波エネルギーの割合を簡易的に表現できるため、この波反射率を波エネルギー吸収率を表すパラメータとして設定する。

次に、各種計算条件に対して、3次元ポテンシャル接続法に基づく周波数領域での浮体動揺計算を実施する。浮体動揺計算では、波向方向における浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布、浮消波堤周りの平面波高分布、浮消波堤の背後海域における平均波高に加え、浮消波堤の動揺量について計算結果を整理する。そして、得られた計算結果から、浮消波堤の形状や係留方式、また波力発電装置による波エネルギー吸収の波浪低減効果への影響について考察し、波力発電浮消波堤の有効性を評価する。

### 4.2 浮体動揺計算

#### (1) 概要

本研究で採用した3次元ポテンシャル接続法は、2次元波浪の境界値問題の計算法である速度ポテンシャルの接

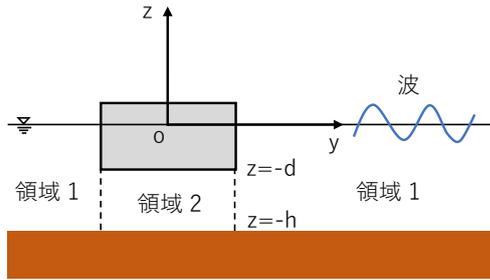


図-4.1 2次元ポテンシャル接続法の概念図 (断面)

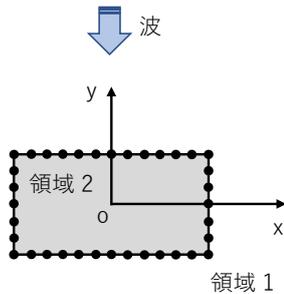


図-4.2 3次元ポテンシャル接続法の概念図 (平面)

統法 (領域分割法) に Green 関数を導入して 3 次元に拡張した方法である (井島, 1974). この 3 次元ポテンシャル接続法は, 波浪外力が作用する大型矩形浮体の時間領域での動揺計算において, 浮体の運動方程式を構成する波力および流体力を算定する手法として適用されている (上田ら, 1980). 浮体の波力・流体力の算定法は, 線形ポテンシャル理論に基づく方法として, 領域分割法 (固有関数展開法, ポテンシャル接続法とも呼ぶ), 境界要素法 (Green 関数法, 特異点分布法とも呼ぶ), 多重極展開法などがある (例えば, 日本造船学会海洋工学委員会性能部会, 2003). これらの手法の中で, 本研究では, 浮消波堤のような矩形浮体に適用し易く, 3 次元浮体の波力・流体力を計算すると同時に浮体周辺の平面的な波高分布も求めることができる 3 次元ポテンシャル接続法を採用した.

### (2) 2次元ポテンシャル接続法

図-4.1 は, 2次元ポテンシャル接続法の概念図を示す. ポテンシャル接続法では, 浮体が存在する部分と存在しない部分のように, 水面と水底の境界条件が異なる 2 つの流体域が接続する場合を想定する. 次に, これらの境界条件を満足するような水面からの深さ  $z$  に関する直交関数系を用いて, 各領域における速度ポテンシャルを未定係数を有する無限級数に展開する. そして, 仮想境界面での 2 つの力学的連続条件を満足するように未定係数を決定する. 以上の計算は, 最終的には多元連立 1 次方程式を未定係数について解くものとなる. このとき, 浮体は水面に固定されており, 動揺しないものと仮定している.

### (3) 3次元ポテンシャル接続法

3次元ポテンシャル接続法は, 2次元ポテンシャル接続

法を水平面上に存在する任意平面形状の浮体に適用できるように拡張したものである. 図-4.2 は, 3次元ポテンシャル接続法の概念図を示す. 3次元ポテンシャル接続法では, 水面と水底の境界条件が異なる 2 つの流体域が任意の平面形状で接続する場合を想定する. そして, 2次元の場合と同様に, 各領域における速度ポテンシャルを深さ  $z$  に関する直交関数系で展開し, その係数を平面上の位置  $(x, y)$  による Green 関数で表現して, 仮想境界面での力学的連続条件を満足するように決定する. この方法でも, 多元連立 1 次方程式を未定係数について解くことになる.

連立 1 次方程式を作成する際, 水平面内の浮体の形状を表す境界線を  $N$  個のセグメントに分割することにより, Green 関数を適用して得られる積分方程式を 1 次方程式に変換する. 図-4.2 において, 黒丸はノードを表し, 2 つのノード間が 1 つのセグメントである. 図では, 浮体の平面形状が長方形であるが, 任意の平面形状の浮体を考慮することができる. また, 波向も, 任意の波向に対応した計算が可能である. なお, 浮体底面は,  $M$  枚のパネルに分割して, 作用する流体圧力を計算する. 以上の手順では, 浮体は動揺しないものと仮定しているが, 浮体が動揺する場合には, 浮体の側面および底面における運動学的境界条件を考慮して上記の多元連立 1 次方程式を再構築し, さらに浮体の 6 自由度の運動方程式を加える必要がある.

### (4) 波高分布の計算式

3次元ポテンシャル接続法の詳細な計算式は, 井島 (1974), 上田ら (1980) に詳しく説明されている. ここでは, 波力発電浮消波堤の周辺の平面的な波高分布を計算するために特に必要となる数式のみを記述する.

図-4.1 および図-4.2 に示すように,  $x$  軸,  $y$  軸を静水面に取り,  $z$  軸を鉛直上方に取る. 水深  $h$  の海域に, 水平面内は任意形状で喫水  $d$  の方向には一定形状の浮体が浮かんでいる. ここで,  $x$  軸と  $\theta$  の角度を有する角周波数  $\sigma$  の余弦波が入射すると仮定する. このとき, 入射波  $\zeta$  は, 次式のように表される.

$$\zeta = \zeta_0 \exp[-i\{k(x \cos \theta + y \sin \theta) + \sigma t\}] \quad (1)$$

ここで,  $\zeta_0$ : 入射波の振幅,  $k$ : 波数,  $t$ : 時間,  $i$ : 虚数単位である.

流体域を浮体の周辺の領域 1 および浮体の底面下の領域 2 に分けて, 速度ポテンシャルをそれぞれ  $\Phi_1(x, y, z)e^{-i\sigma t}$  および  $\Phi_2(x, y, z)e^{-i\sigma t}$  とすると, これらは Laplace 方程式を満足する. 境界条件および力学的連続条件を考慮して, Laplace 方程式を満足する速度ポテンシャルを領域 1 および領域 2 について, それぞれ次式のように仮定する.

$$\Phi_1(x, y, z) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \{f_0(x, y) + f_1(x, y)\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \frac{g\zeta_0}{\sigma} \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(x, y) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \quad (2)$$

$$\Phi_2(x, y, z) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left\{ \varphi_0(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x, y) \cos \bar{s}(z+d) \right\} + \frac{g\zeta_0}{\sigma} (\text{浮体動揺に関する項}) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{s} = s\pi/(h-d)$  ( $s$  は自然数)、 $g$ : 重力加速度、 $k$  および  $k_n$  は次式の根である。

$$kh \tanh kh = -k_n h \tan k_n h = \sigma^2 h/g \quad (n \text{ は自然数}) \quad (4)$$

また、 $f_1(x, y)$ ,  $f_2^{(n)}(x, y)$ ,  $\varphi_0(x, y)$ ,  $\varphi_s(x, y)$  は、未定係数であり、 $f_0(x, y)$  は入射波に対する速度ポテンシャルを表し、次式で示される。

$$f_0(x, y) = -i \exp\{-ik(x \cos \theta + y \sin \theta)\} \quad (5)$$

(浮体動揺に関する項) は、浮体が動揺する場合に、浮体の底面における運動学的境界条件を満足するように定められる付加項であり、ここでは数式を省略する。

浮体の形状を表す境界線を  $N$  個のセグメントに分割し、Green 関数を用いて未定係数  $f_1(x, y)$ ,  $f_2^{(n)}(x, y)$ ,  $\varphi_0(x, y)$ ,  $\varphi_s(x, y)$  を展開することにより、 $N$  個のセグメント上での関係式を組み立てる。これに、浮体の動揺 6 成分を複素振幅で表した浮体の 6 自由度の運動方程式を組み合わせ、領域 1 の速度ポテンシャルの無限級数項の項数  $n$  と領域 2 の速度ポテンシャルの無限級数項の項数  $s$  をある一定値  $n^*$  および  $s^*$  まで取れば、多元連立 1 次方程式の次元が  $(n^* + s^* + 2)N + 6$  と確定する。この多元連立 1 次方程式を解くことにより、未定係数  $f_1(x, y)$ ,  $f_2^{(n)}(x, y)$ ,  $\varphi_0(x, y)$ ,  $\varphi_s(x, y)$  および浮体の 6 成分の動揺量 (複素振幅) を求めることができる。ここで、浮体の運動方程式には、係留索による係留力を考慮することも可能であるが、この方法は周波数領域での浮体動揺計算法であるため、係留力は線形でなければならない。

領域 1 における速度ポテンシャルが得られれば、浮体の周辺における波高分布は、領域 1 における波の振幅と入射波の振幅の比  $K_d$  (波振幅比) として次式で計算される。以下では、この波振幅比を波高比として表すものとする。

$$K_d = \left| f_0(x, y) + f_1(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(x, y) \right| \quad (6)$$

#### (5) 波エネルギー吸収の計算方法

本研究では、この波高分布の式を用いることにより、波力発電浮消波堤の波エネルギー吸収による波浪低減効果への影響を評価する。3次元ポテンシャル接続法において、波力発電装置による波エネルギー吸収を考慮する場合には、浮体から反射しない波は波力発電装置によってその波エネルギーが吸収されているものと仮定し、波エネルギー吸収率を波反射率  $K_r$  で簡易的に表現する。具体的には、波力発電装置の開口部がある浮消波堤の前面部分に対応する境界線上のセグメントにおいて、作用する入射波の振幅を波反射率を用いて強制的に低下させる。このようにすることで、波力発電装置によって吸収される波が浮消波堤の動揺やその周囲の波浪に対して作用しないように計算することが可能である。波反射率から波エネルギー吸収率への換算については、波エネルギーは波の振幅の 2 乗に比例することから、入射波の振幅を 1 とすると、波エネルギー吸収率は 1 から波反射率の 2 乗を差し引いて求めることができる。

#### 4.3 計算条件

3次元ポテンシャル接続法に基づく周波数領域での浮体動揺計算を行うために、波力発電浮消波堤の浮体諸元および係留方式等に関する計算条件を設定する。計算条件は、浮体条件、係留条件およびシミュレーション条件の 3 つに分けることができる。

##### (1) 浮体条件

浮体条件は、浮消波堤の形状などの浮体の諸元や波力発電装置の波エネルギー吸収の設定に関する条件である。表-4.1 および表-4.2 は、それぞれ単数および複数の場合の浮消波堤の諸元を示す。以下では、それぞれ浮消波堤 (単数) および浮消波堤 (複数) と表記する。

浮消波堤 (単数) の基本的な諸元は、長さ 50.0m × 幅 10.0m × 喫水 5.0m であり、これが Case A に該当する。これに対して、Case A' および Case A'' は、幅を 10.0m の一定として、それぞれ喫水を 7.5m および 10.0m に増加させたケースである。また、Case B および Case C は、喫水を 5.0m の一定として、それぞれ幅を 20.0m および 30.0m に増加させたケースである。浮消波堤の乾舷は、2.0m の一定としている。なお、水深は、過去の浮消波堤の施工事例 (高木, 1996) を参考に 25.0m とした。一方、浮消波堤は、複数で利用されることが一般的であり、本研究では、複数で構成された浮消波堤 (複数) の基数を 2 基および 3 基と設定した。ここで、3次元ポテンシャル接続法を用いた浮体動揺計算では、複数浮体の計算を行うことができないため、浮消波堤 (複数) については、浮消波堤 (単数) の

表-4.1 浮消波堤（単数）の諸元

ケース	Case A	Case A'	Case A''	Case B	Case C
長さ (m)	50.0				
幅 (m)	10.0			20.0	30.0
喫水 (m)	5.0	7.5	10.0	5.0	
深さ (m)	7.0	9.5	12.0	7.0	
重心 (KG) (m)	2.50	3.75	5.00	2.50	
傾心 (GM) (m)	1.67	1.11	0.83	6.67	15.00
重量 (t)	2,575	3,863	5,150	5,150	7,725
水深 (m)	25.0				

長さを延長した一体の浮体として計算することとした。

表-4.2 に示されている Case A1 は、表-4.1 の Case A と同じケースであり、Case A2 および Case A3 がそれぞれ 2 基および 3 基の場合の浮消波堤に対応する。これらのケースでは、それぞれ Case A1 の浮消波堤の長さを 2 倍および 3 倍した長さとなっている。

波力発電装置による波エネルギー吸収については、先に示したように波エネルギー吸収率を表すパラメータとして波反射率を設定する。表-4.3 は、波力発電装置による波エネルギー吸収のパラメータ設定について示す。ここでは、浮消波堤の前面の波反射率 $K_r$ を 1.0, 0.7, 0.5 および 0.1 の 4 種類と設定した。これらは、波エネルギー吸収率として、それぞれ 0.0%, 51.0%, 75.0% および 99.0% と換算することができ、波力発電装置の波エネルギー吸収として、それぞれ「装置なし」、「50%吸収」、「75%吸収」

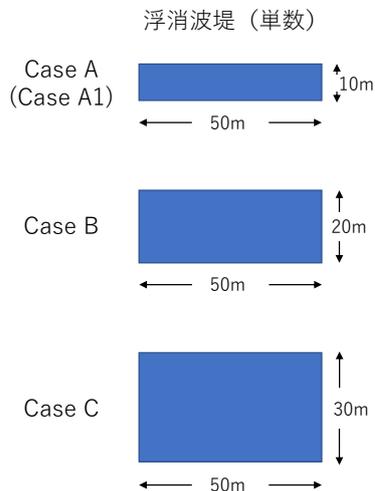


図-4.3 浮消波堤（単数）の平面形状

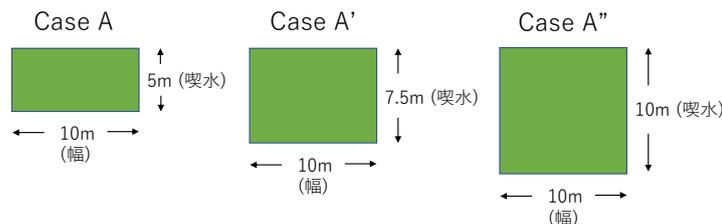


図-4.5 浮消波堤（単数）の断面形状

表-4.2 浮消波堤（複数）の諸元

ケース	Case A1	Case A2	Case A3
長さ (m)	50.0	100.0	150.0
幅 (m)	10.0		
喫水 (m)	5.0		
深さ (m)	7.0		
重心 (KG) (m)	2.50		
傾心 (GM) (m)	1.67		
重量 (t)	2,575	5,150	7,725
水深 (m)	25.0		

表-4.3 波力発電装置による波エネルギー吸収の設定

波力発電装置の設定	装置なし	50%吸収	75%吸収	99%吸収
浮消波堤の前面反射率	1.0	0.7	0.5	0.1
波エネルギー吸収率 (%)	0.0	51.0	75.0	99.0

および「99%吸収」と表記する。波エネルギー吸収率は、発電効率とも読み替えることができるが、浮体式波力発電装置の発電効率は、波周期依存性が高いために入射波の波周期により大きく変動する（居駒ら, 2013；永田, 2015；鈴木, 2015）。そこで、本研究では、波力発電装置による波エネルギー吸収を 4 種類ほど設定し、これらの能力を有する波力発電装置が搭載された浮消波堤による波浪低減効果への影響を比較することとした。なお、振動水柱型の波力発電装置では、理論的には 100%の波エネルギーを吸収することが可能である（前田ら, 1982）が、マイティーホエールの発電効率（一次変換効率）の最大値は、水槽模型実験で 50%程度、また実海域実証実験で 35%程度であったことが報告されている（鷲尾ら, 2001）。

図-4.3 および図-4.4 は、それぞれ浮消波堤（単数）および浮消波堤（複数）の平面形状を示し、また、図-4.5 は、浮消波堤（単数）の断面形状を示す。Case A2 および Case



図-4.4 浮消波堤（複数）の平面形状

表-4.4 係留の種類

係留の種類	規格等
無係留	係留なし
合成繊維索	テトロンSタフレ
ワイヤ索	ワイヤ (6×37) A種
剛係留	ワイヤ索のばね定数1,000倍

表-4.5 係留索の諸元

種類	合成繊維索	ワイヤ索
規格	テトロンSタフレ	ワイヤ (6×37) A種
径	80mm	53mm
引張強さ	1,480kN	1,490kN
破断時伸び	9.96m	0.75m

A3のように浮消波堤（複数）は、浮消波堤（単数）を2基または3基接続した形状であり、一体的な単体の浮消波堤として浮体動揺計算を実施する。実際には、複数の浮消波堤の間にはある程度の離隔が存在するため、本研究ではこの離隔を通過する波浪の影響は考慮していないことになる。また、浮消波堤（単数）の断面形状については、Case AからCase A”へと喫水が大きくなるにつれて正方形の断面形状へと変化する。

(2) 係留条件

係留条件は、係留索の種類や諸元、また係留索の配置などの係留方式に関する条件である。表-4.4は、本研究で採用した係留の種類を示す。また、表-4.5および表-4.6は、それぞれ係留索の諸元およびばね定数を示す。

浮消波堤のような浮体構造物は、その動揺特性に与える係留方式の影響が大きいことから、「無係留」、「合成繊維索」、「ワイヤ索」および「剛係留」の柔らかい係留から硬い係留まで4種類を設定した。これらの異なった係留方式の比較は、Case A、Case BおよびCase Cについて実

表-4.6 係留索のばね定数

	Case A	Case A'	Case A''	Case B	Case C
合成繊維索 (kN/m)	148.6	222.9	297.2	297.2	445.8
ワイヤ索 (kN/m)	1994.2	2991.3	3988.3	3988.3	5982.5

施している。浮消波堤の係留においては、チェーンとアンカー（またはシンカー）を用いたカタナリー係留が主流と考えられるが、本研究では波力発電浮消波堤という新たなコンセプトを提案することや係留力が線形の範囲内での浮体動揺計算を行うことなどから、線形ばねの伸び一張力特性を持つ係留索による係留方式を採用している。無係留は、係留索を用いずに浮消波堤が自由に動揺できる状態であり、剛係留は、ワイヤ索のばね定数を1,000倍した特性を有する仮定の係留索を用いた係留である。合成繊維索およびワイヤ索の選定では、係留索メーカーの製品カタログと仕様を参考にした。合成繊維索およびワイヤ索の索径は、それぞれ80mmおよび53mmであり、破断強度は、それぞれ1,480kNおよび1,490kNである。

図-4.6、図-4.7および図-4.8は、それぞれ単数、複数（2基）および複数（3基）の浮消波堤の係留索の配置を示す。浮消波堤（単数）に対して係留索は4本であり、浮体の4隅の静水面上の係留点から海底面に向かって斜め下方に展張され、アンカーに係留されている。浮消波堤（複数）の係留索の本数は、浮消波堤（単数）の係留索の本数を基数倍したものとなる。係留索の諸元を決定する際には、浮消波堤（単数）の係留配置を基本として、設計外力に対応する係留索を選定している。対象海域を想定していないため、設計外力の設定は難しいが、本研究では、極値条件として設定した風圧力（風速45.0m/s）および流圧力（潮流速1.0m/s）の和の定常外力に、波浪分の変動外

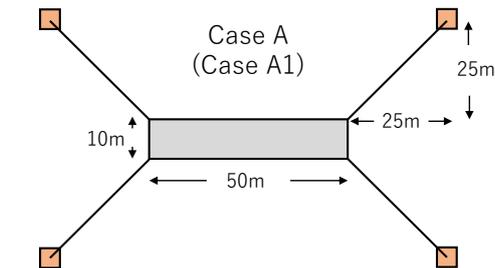


図-4.6 浮消波堤（単数）の係留索の配置

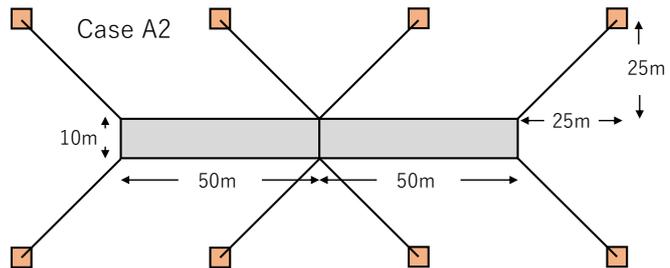


図-4.7 浮消波堤（複数：2基）の係留索の配置

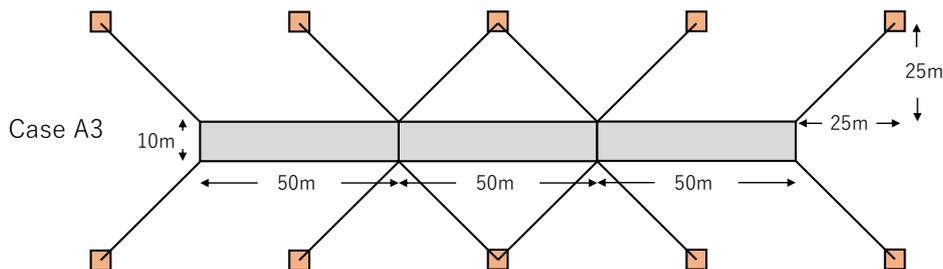


図-4.8 浮消波堤（複数：3基）の係留索の配置

表-4.7 計算パラメータの設定

浮体の分割幅	周辺	2.50m
	底面	1.25m
無限級数項の項数	周辺	$n^*=5$
	底面	$s^*=5$

表-4.8 波浪条件

波周期	4.0s, 6.0s, 8.0s, 10.0s, 12.0s
波高	2.0m (波振幅1.0m)
波向	90° (浮体直角方向)

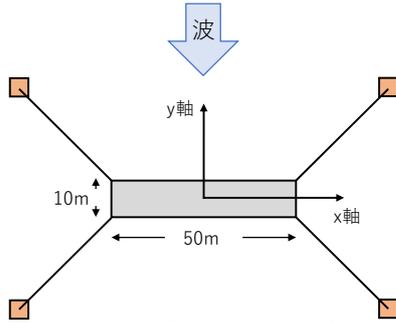


図-4.9 波向および座標軸

力として仮定した係数3を乗じることで設計外力とした。設計外力として波浪を考慮する場合、通常は浮体動揺計算を行う必要があるが、対象とする浮消波堤のケース数が多いことからこのような簡易的な方法を採用した。

この設計外力に対して、浮消波堤(単数)の係留索4本のうち2本のみで作用荷重を分担するものとし、さらに安全率3.0を考慮した上で適切な諸元を有する合成繊維索およびワイヤ索を選定した。表-4.5に示されている係留索の破断時伸びは、係留索長43.3mに対する係留索破断時の伸びを意味している。表-4.6の係留索のばね定数は、浮消波堤(単数)(Case A)の合成繊維索およびワイヤ索のばね定数に各ケースにおける浮消波堤のCase Aに対する重量比を乗じて求めたものである。なお、浮体動揺計算においては、係留索の初期張力は0kNとしている。

### (3) シミュレーション条件

シミュレーション条件は、3次元ポテンシャル接続法に基づく浮体動揺計算を実施する際の計算パラメータの設定や入射波浪に関する条件である。表-4.7は、3次元ポテンシャル接続法における主な計算パラメータの設定値を示す。また、表-4.8および図-4.9は、それぞれ入射波の波浪条件および浮消波堤に対する波向を示す。

3次元ポテンシャル接続法における浮消波堤の平面形状境界線の分割幅(セグメント長さ)は、入射波の最小波長の約1/10(上田ら, 1980)として2.50mと設定した。また、浮消波堤の底面の分割幅は、セグメント長さの1/2とした。速度ポテンシャルの無限級数項の項数の最大値は、連立1次方程式の次元が大きくなると計算時間が増大す

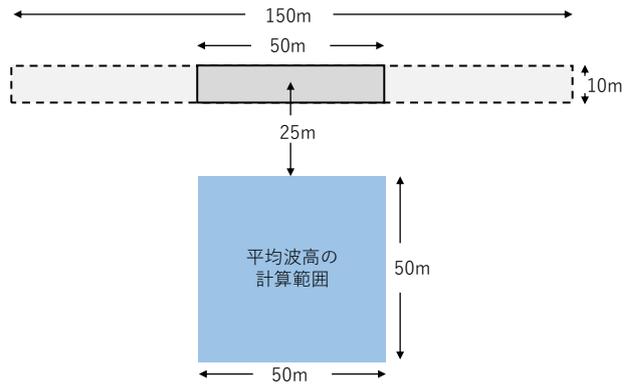


図-4.10 浮消波堤の背後海域における平均波高の計算範囲

るため、 $n^*$ および $s^*$ ともに5と設定した。浮体動揺計算は、周波数領域での計算となることから、入射波は規則波とし、波周期は、4s, 6s, 8s, 10sおよび12sの5種類とした。また、入射波の振幅に対する浮消波堤周辺の波の振幅の比を計算することにより、浮消波堤の背後海域における波高分布を算定する。このため、入射波の波高は、2.0m(波振幅1.0m)とし、最も消波効果の大きくなる浮消波堤の真横に垂直に作用する波向とした。

本研究では、波力発電浮消波堤による波浪低減効果を評価するための指標として、一定範囲の海域における平均波高(波高の平均値)を採用した。図-4.10は、浮消波堤の背後海域における平均波高の計算範囲を示す。平均波高の計算範囲は、全てのケースにおいて、浮消波堤の中心位置から後方に25mの地点から50m×50mの正方形の範囲とした。この計算範囲の設定の仕方は様々に考えられるが、ここでは、浮消波堤の動揺による造波の影響をなるべく受けにくくするため、浮消波堤からある程度離れた浮消波堤(単数)の長さを1辺とする正方形とした。

## 5. 計算結果および考察

### 5.1 概要

3次元ポテンシャル接続法に基づく周波数領域での浮体動揺計算によって得られた計算結果から、浮消波堤の形状や係留方式、また波力発電装置による波エネルギー吸収の波浪低減効果への影響について考察し、波力発電浮消波堤の有効性を評価する。

浮消波堤のような浮体構造物の動揺特性は、係留方式の影響を大きく受けるため、浮消波堤の波浪低減効果に対しても影響が大きいことが予想される。そこで、まず、4種類の係留方式を用いた浮消波堤による波浪低減効果への影響について比較し、効果的な係留方式を選定する。次に、選定した係留方式を用いた波力発電浮消波堤について、波エネルギー吸収を考慮した場合の波浪低減効果

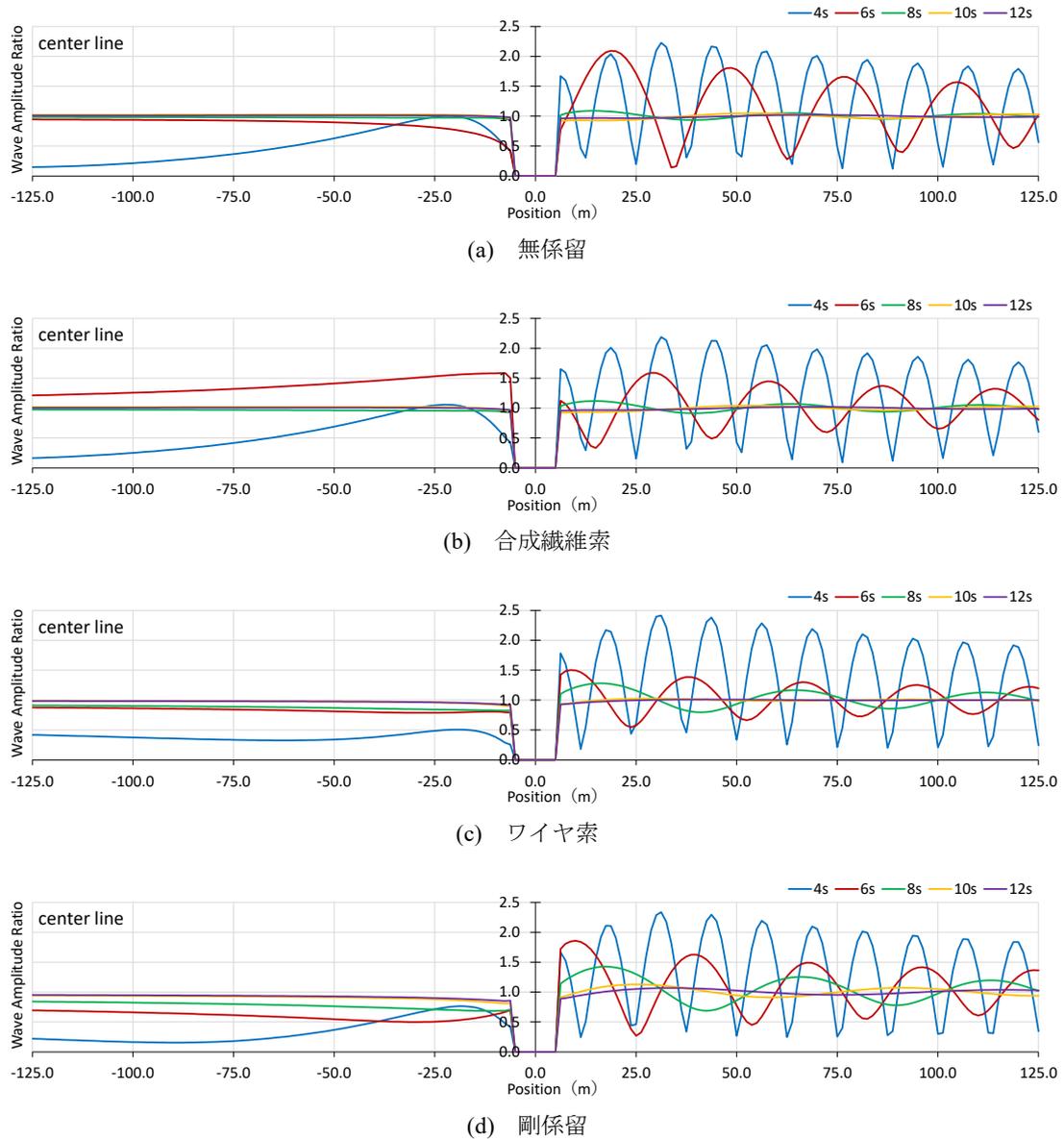


図-5.1 浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布 (Case A)

について検証する。ここでは、波向方向における浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布、浮消波堤周りの平面波高分布、浮消波堤の背後海域における平均波高および浮消波堤の動揺量の計算結果を示して考察する。

## 5.2 係留方式の波浪低減効果への影響

### (1) 浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布

浮消波堤の波向方向におけるセンターラインである  $y$  軸上の断面波高分布について示す。図-5.1は、Case Aにおける各係留方式の場合の断面波高分布を示したものである。横軸は  $y$  軸方向の位置であり、縦軸は波の振幅と入射波の振幅の比である波振幅比(波高比)である。浮消波堤の前方では、反射波によって波周期が短いほど波高が増幅しており、その一方で浮消波堤の背後では波高が低

減している。その波高の低減は、合成繊維索の場合を除いて、波周期が短いほど大きい傾向にあり、係留方式ごとに比較すると、剛な係留方式になるほどより低減している。ただし、10s以上の長い波周期になると、剛な係留方式においても大きな波浪低減効果が得られず、波高比が1.0程度に落ち着いている。これは、波周期が長いほど、入射波が浮消波堤の背後に透過していくことを意味しており、浮体構造物において一般的な特徴である。合成繊維索の場合では、波周期6sのときに浮消波堤背後の波高が大きくなっているが、これは、浮消波堤の動揺による造波の影響によるものと推察される。

### (2) 浮消波堤周りの平面波高分布

浮消波堤の周辺海域の平面的な波高分布について示す。図-5.2は、Case Aにおける各係留方式の場合の平面波高

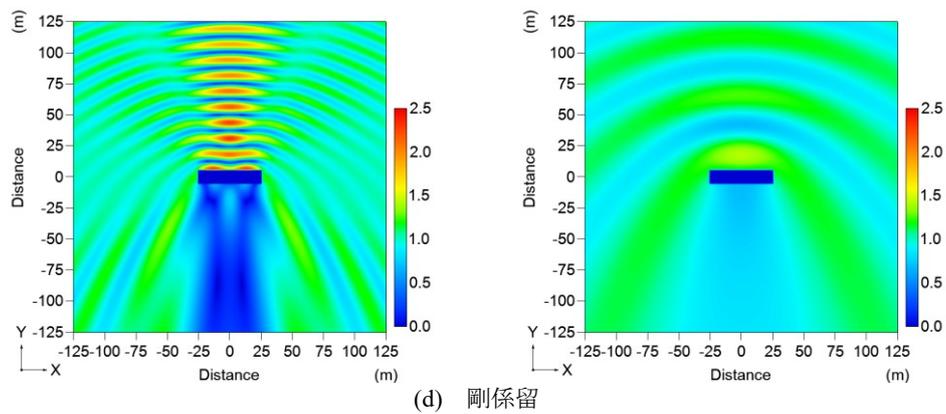
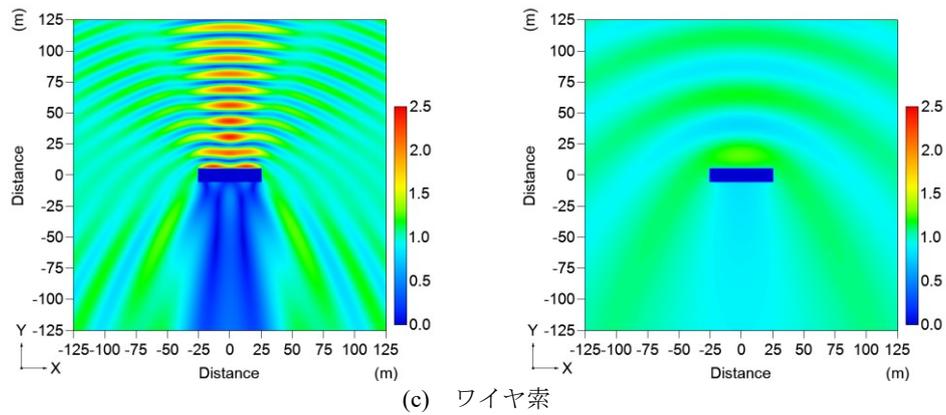
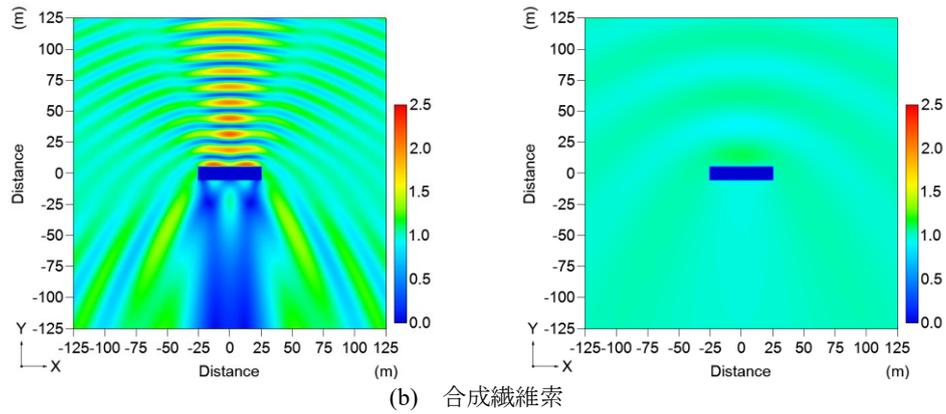
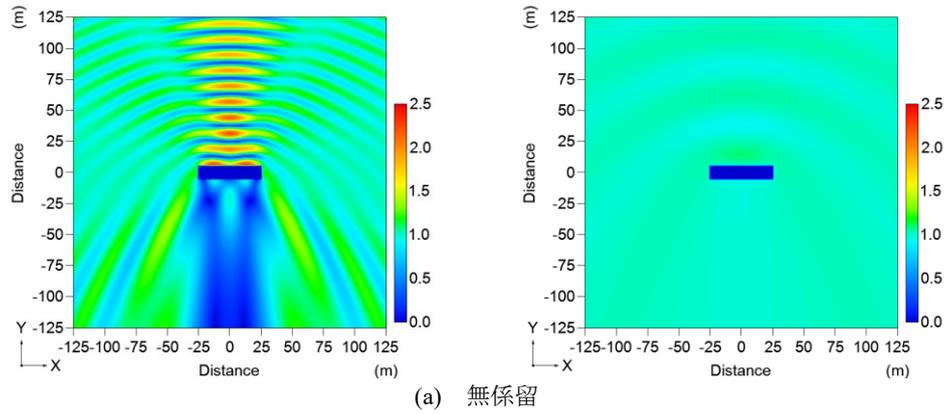
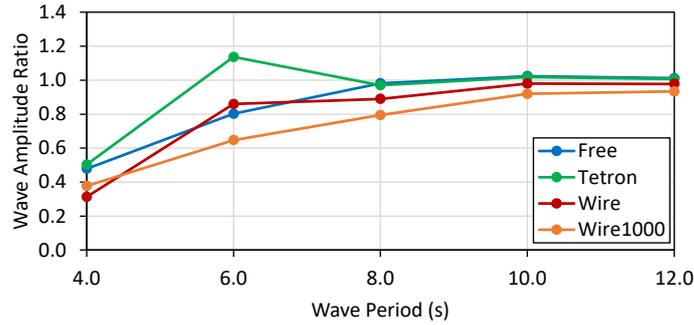
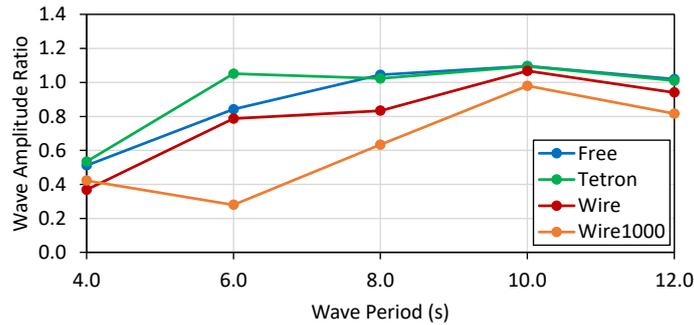


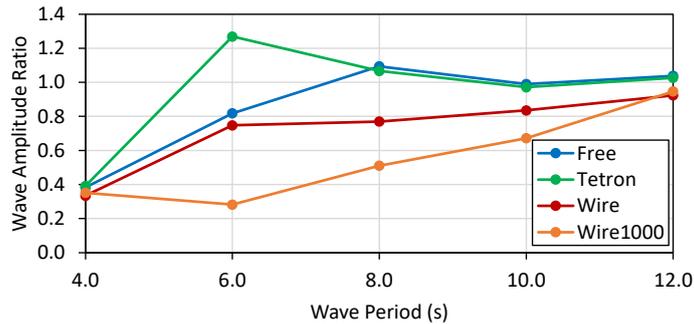
図-5.2 浮消波堤周りの平面波高分布 (Case A)  
(左: 波周期 4s, 右: 波周期 8s)



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

図-5.3 浮消波堤の背後海域における平均波高  
 <係留方式による影響の比較>

分布を示したものである。左図は波周期4sの場合であり、右図は波周期8sの場合である。図の中心の青色で示されている長方形が浮消波堤である。また、波高分布は、図-5.1と同様に波振幅比（波高比）で表している。波周期4sの場合では、浮消波堤の前方で反射波の影響により波高が増幅しており、浮消波堤の背後では波高が低減していることが明瞭である。また、浮消波堤の側方から背後に向かって回折波が発生している。無係留および合成繊維索の場合は、浮消波堤のすぐ背後に波高の大きい部分があるが、ワイヤ索の場合は全体的に波高が低くなっている。一方、波周期8sの場合では、波周期4sの場合ほど明瞭な波高分布が見られない。これは、特に柔な係留方式の場合に顕著であり、波高比が1.0に近く、入射波がほぼ透過しているからである。しかしながら、剛な係留方式になるほど、浮消波堤が入射波の透過を防止するように作用し、浮消波堤

の背後海域における波浪低減に寄与している。すなわち、ワイヤ索や剛係留のような剛な係留方式は、合成繊維索のような柔な係留方式に比べて、長い波周期の入射波に対して効果が大きいと考えられる。

### (3) 浮消波堤の背後海域における平均波高

浮消波堤からある程度離れた背後海域における平均波高について示す。図-5.3は、Case A、Case BおよびCase Cにおける各係留方式の場合の平均波高を比較して示したものである。横軸は波周期であり、縦軸は波振幅比（波高比）である。波周期6sにおいて大きなピークを有する合成繊維索の場合を除いて、全体的に波周期が短くなるほど波高比は小さく0.4程度に近づき、波周期が長くなるほど波高比は大きく1.0程度に近づく。これは、先に示したように波周期が長いほど、入射波がそのまま浮消波堤の背後に透過しているからである。係留方式の種類によって、

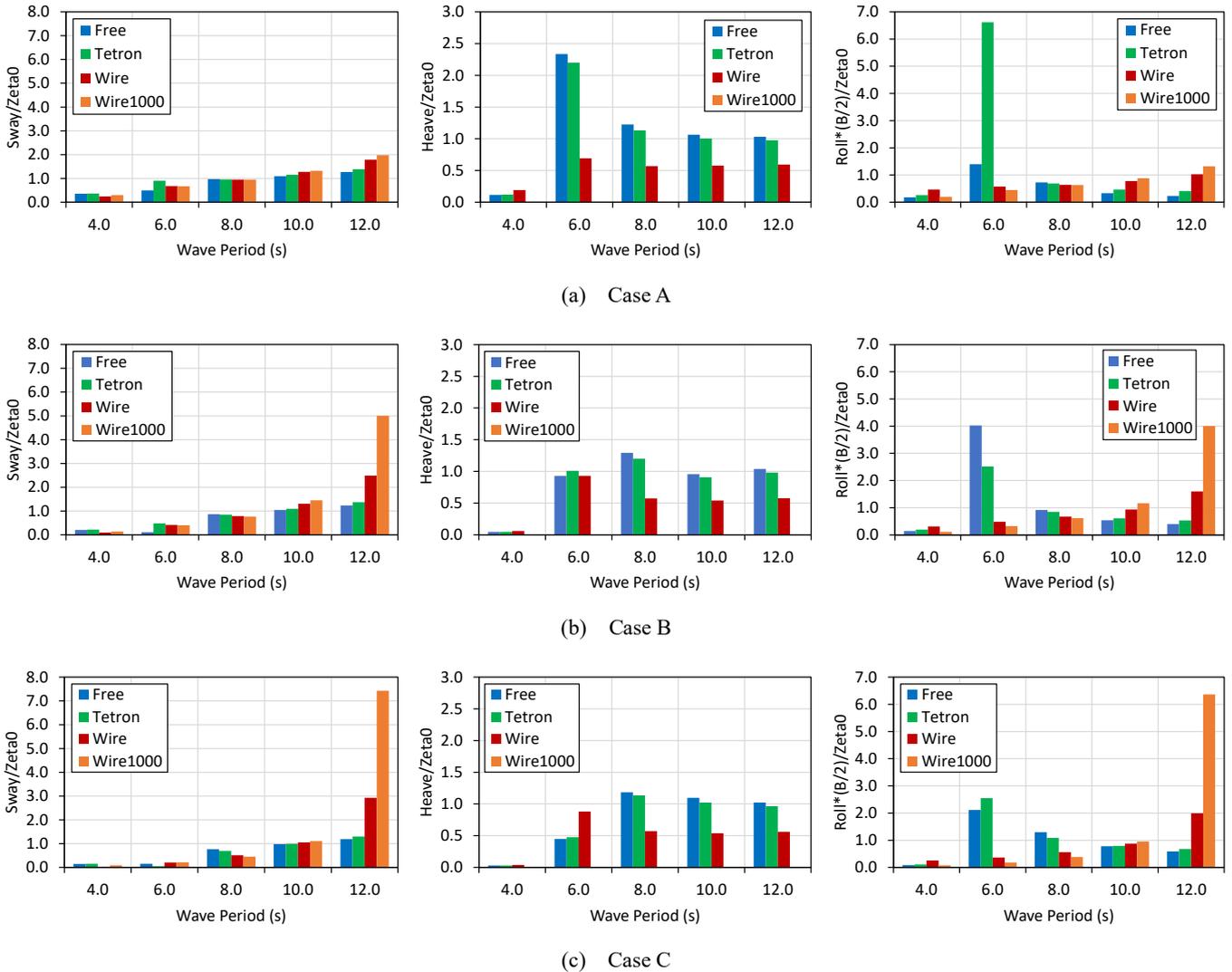


図-5.4 浮消波堤の動揺量  
 <係留方式による影響の比較>  
 (左：スウェイ，中：ヒープ，右：ロール)

平均波高の波周期特性は大きく異なり，浮消波堤と係留索で構成される全体係留系の固有周期が大きく影響していると考えられる。また，剛な係留方式になるほど波浪低減効果が大きくなっており，特に剛係留の場合は，浮体幅の広いCase Cの場合に効果が大きい傾向にある。剛係留は，仮想的な係留方式であることから，以下において，波力発電装置の波エネルギー吸収による波浪低減効果の検証には，ワイヤ索を用いた係留方式を採用することとした。

#### (4) 浮消波堤の動揺量

入射波が作用することによって発生する浮消波堤の動揺量について示す。図-5.4は，Case A，Case BおよびCase Cにおける各係留方式の場合の浮消波堤の動揺量を比較して示したものである。左図はスウェイ（横方向の動揺），中央図はヒープ（上下方向の動揺），また右図はロール（x軸周りの動揺）である。横軸は波周期，縦軸は各動揺成分

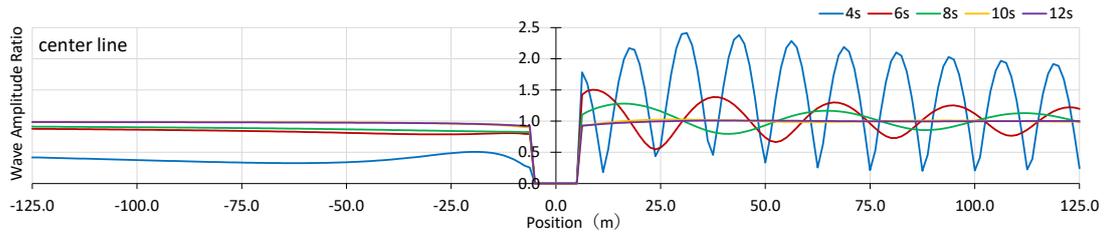
の動揺量であり，スウェイとヒープはそのままの値を，またロールは浮消波堤の半幅を乗じた値を入射波の振幅で除した無次元値である。いずれのケースでも，無係留および合成繊維索の場合は，波周期6sのときにロールが大きく，波周期6s以上においてヒープが大きくなる傾向にある。図-5.3と考え合わせると，合成繊維索の場合は，ロールの固有周期が波周期6s付近にあり，このことが浮消波堤背後の波高の増大に繋がっているものと考えられる。

#### 5.3 波力発電装置の波浪低減効果（浮体幅の影響）

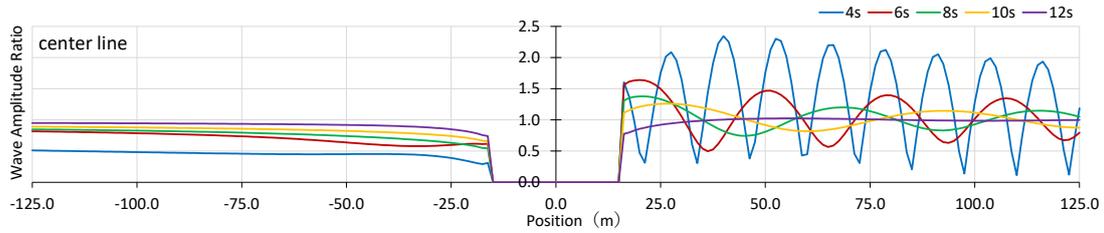
波力発電装置の波エネルギー吸収による波浪低減効果について，浮消波堤（単数）の浮体幅の影響を考慮して比較する。

##### (1) 浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布

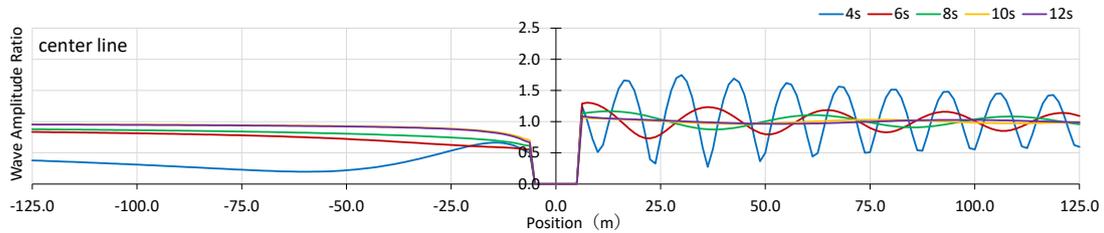
浮消波堤の波向方向におけるセンターライン（y軸）上



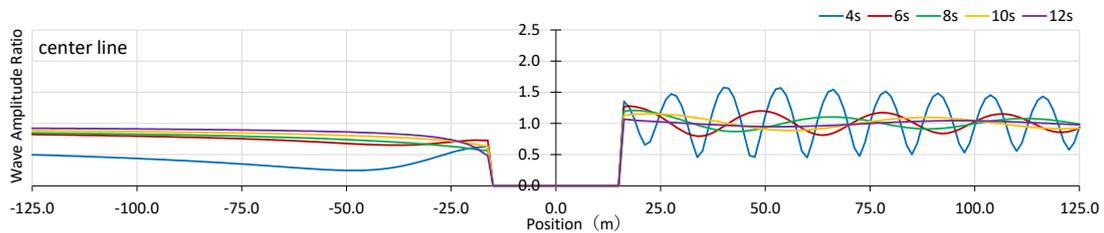
(a) 装置なし (Case A)



(b) 装置なし (Case C)



(c) 75%吸収 (Case A)



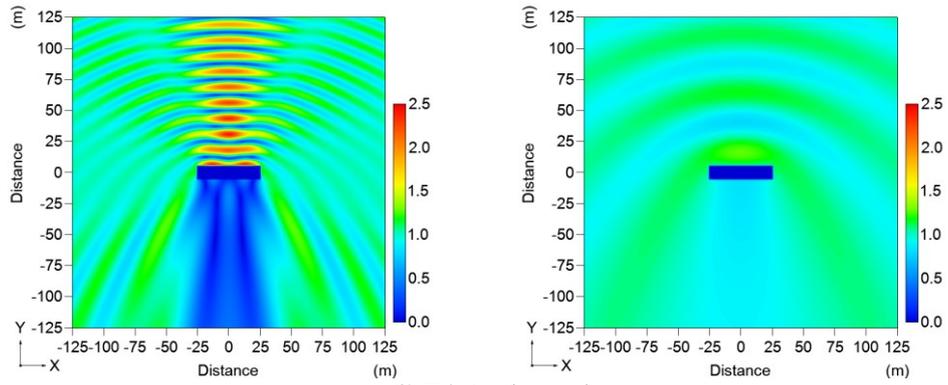
(d) 75%吸収 (Case C)

図-5.5 浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布 (Case A, Case C)

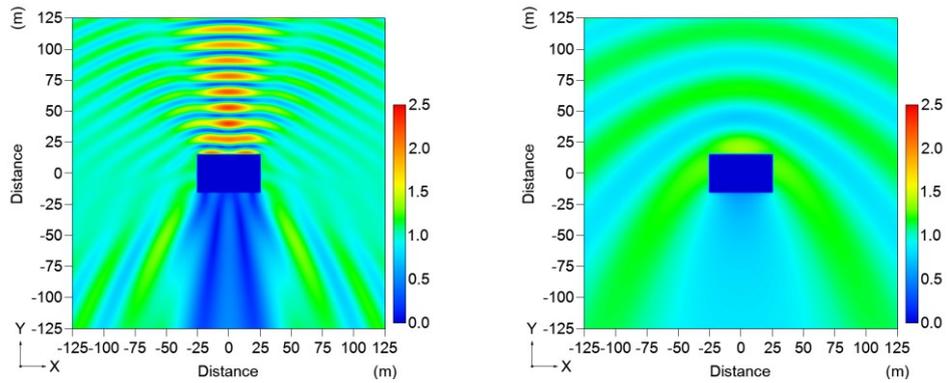
の断面波高分布について示す。図-5.5は、Case AおよびCase Cにおける装置なしおよび75%吸収の場合の断面波高分布を示したものである。横軸はy軸方向の位置であり、縦軸は波振幅比（波高比）である。装置なしの場合は、浮体幅の広いCase CのほうがCase Aと比べて浮消波堤の背後の波高が低減している。これは、幅が広い浮体構造物のほうが、波周期の長い入射波を透過させにくい特徴と一致する。一方、75%吸収の場合は、波力発電装置の波エネルギー吸収により、装置なしの場合よりも反射波が小さくなるため、浮消波堤の前方の波高が減少するとともに、背後の波高も低減している。これは、浮消波堤に波力発電装置を搭載することによって、浮消波堤背後の波浪を一定程度まで低減可能であることを示唆している。

## (2) 浮消波堤周りの平面波高分布

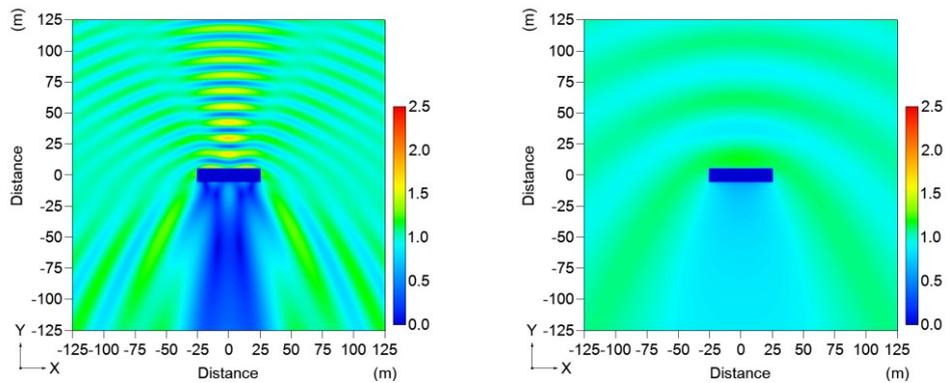
浮消波堤の周辺海域の平面的な波高分布について示す。図-5.6は、Case AおよびCase Cにおける装置なしおよび75%吸収の場合の平面波高分布を示したものである。左図は波周期4sの場合であり、右図は波周期8sの場合である。また、波高分布は、図-5.5と同様に波振幅比（波高比）で表している。装置なしの場合は、波周期4sのときのCase AとCase Cの波高分布の違いは明瞭ではない。一方、波周期8sのときは、浮体幅の広いCase CのほうがCase Aよりも明確な波峰を示し、浮消波堤による波の遮蔽効果が比較的大きいことを表している。また、75%吸収の場合は、装置なしの場合と比べて、浮消波堤の前方の波高が低減しており、浮消波堤の背後の波高が低い範囲も若干広がっているように見える。これは、両方のケースについて波周



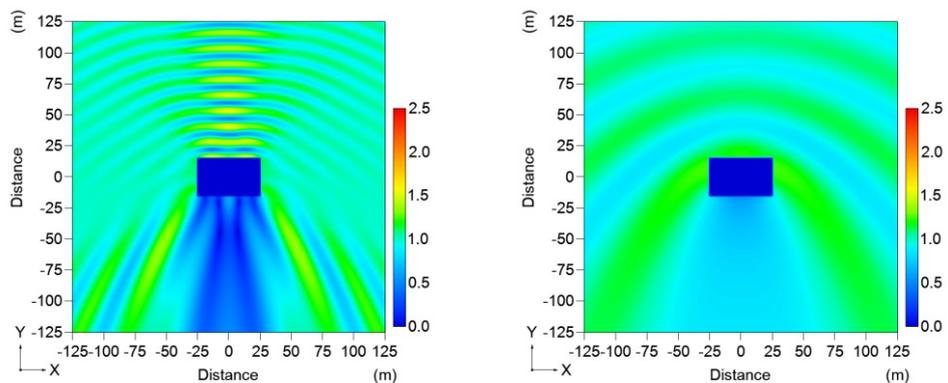
(a) 装置なし (Case A)



(b) 装置なし (Case C)

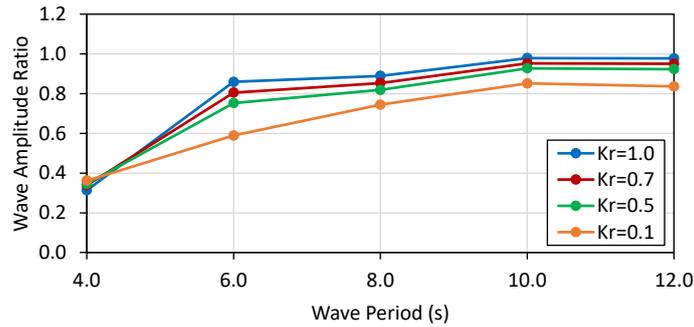


(c) 75%吸収 (Case A)

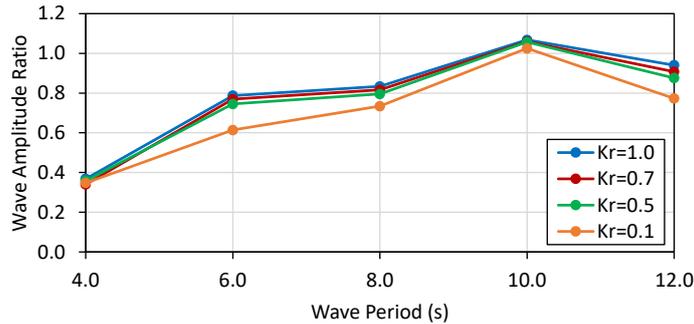


(d) 75%吸収 (Case C)

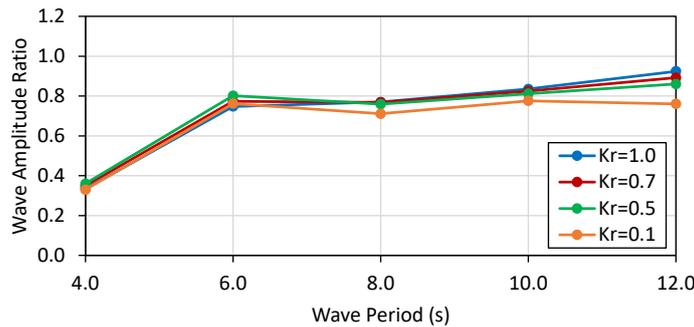
図-5.6 浮消波堤周りの平面波高分布 (Case A, Case C)  
(左: 波周期 4s, 右: 波周期 8s)



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

図-5.7 浮消波堤の背後海域における平均波高  
 <浮体幅による影響の比較>

期4sのときおよび波周期8sのときの両方で見られる傾向である。

(3) 浮消波堤の背後海域における平均波高

浮消波堤からある程度離れた背後海域における平均波高について示す。図-5.7は、Case A、Case BおよびCase Cにおける波力発電装置の波エネルギー吸収率ごとの平均波高を比較して示したものである。横軸は波周期であり、縦軸は波振幅比（波高比）である。Case Aでは、波エネルギー吸収率を上げることにより、波浪低減効果が大きくなる傾向にある。しかしながら、波高比は、75%吸収まではあまり差異がなく、99%吸収にまでしないと大きな波浪低減効果が見込めない。Case Bでも、概ね同様な傾向であるが、波高比は、75%吸収まではほとんど差がなく、99%吸収において波浪の低減が大きくなっている。一方、Case Cでは、Case AおよびCase Bと比べると、波エネルギー吸

収の効果がほとんど出ていない状況である。ただし、Case Cでは、装置なしの場合における波周期8s以上の波高比が0.8~0.9程度であり、Case Aの0.9~1.0と比べて小さくなっており、長周期側においては浮体幅による波浪低減効果があると考えられる。また、Case Bでは、波周期10sのときに波高比が1.0を超えるピークを有しているが、この原因は、浮体幅に伴う回折波と浮消波堤の動揺の両方の影響によるものと推察される。波エネルギー吸収率を上げたとしても、波周期4sのときの波高比は変化がなく、Case AおよびCase Bの場合に波周期6sのときに波高比が最大で0.6まで低下する程度である。また、実際に供用されている浮消波堤の波透過率は、一般的に30%~60%程度である（長野ら、1991；門野、1992；高木、1996；荒見ら、2006）。以上のことから、これらの浮体形状の浮消波堤については、波力発電装置の波エネルギー吸収率を75%よりもかな

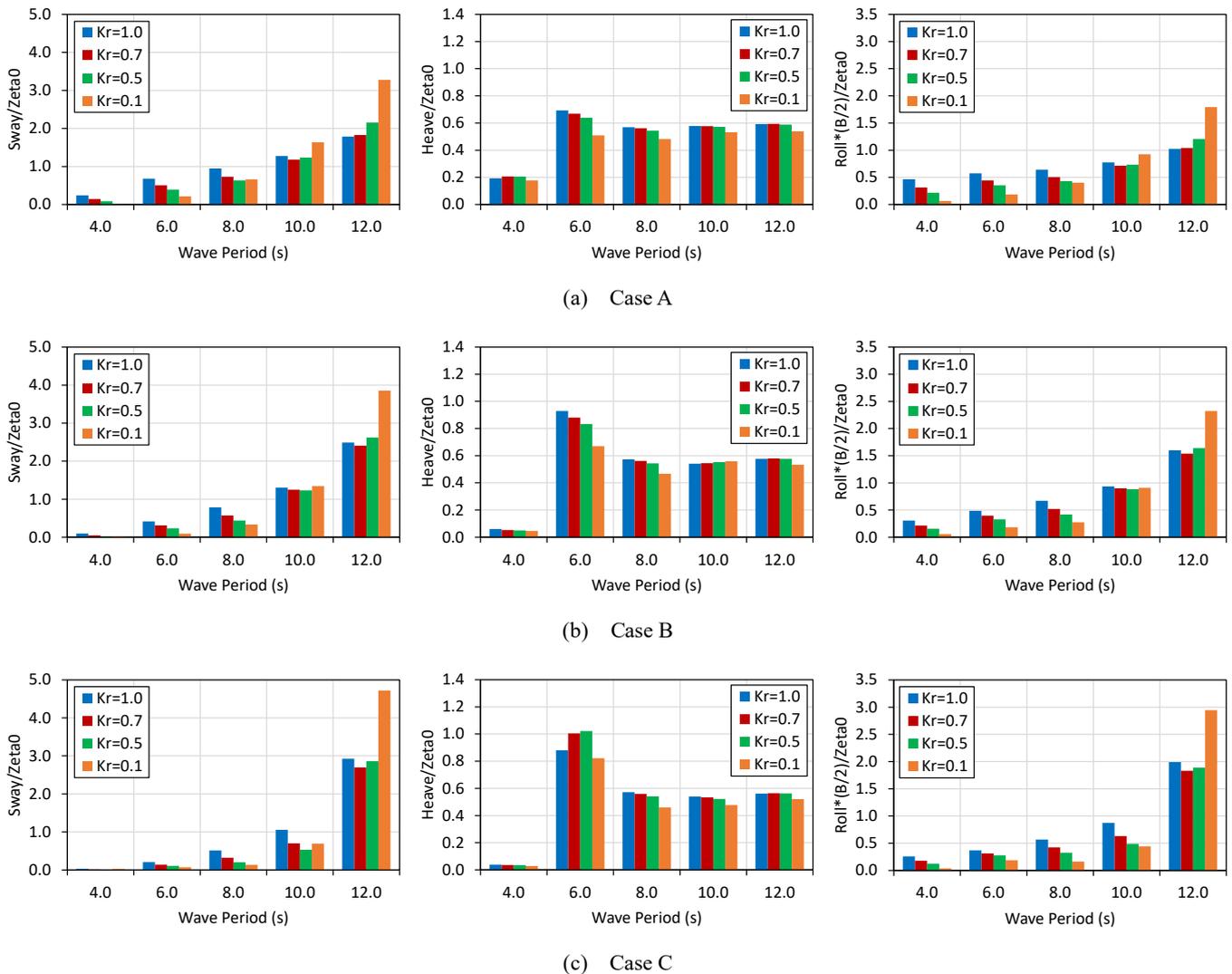


図-5.8 浮消波堤の動揺量  
 <浮体幅による影響の比較>  
 (左：スウェイ，中：ヒープ，右：ロール)

り高くしないと十分な波浪低減効果が得られないと考えられる。

#### (4) 浮消波堤の動揺量

入射波が作用することによって発生する浮消波堤の動揺量について示す。図-5.8は、Case A、Case BおよびCase Cにおける波力発電装置の波エネルギー吸収率ごとの浮消波堤の動揺量を比較して示したものである。左図はスウェイ、中央図はヒープ、また右図はロールである。横軸は波周期、縦軸は各動揺成分の動揺量の無次元値である。各ケースにおいて、波周期10sおよび12sの一部を除き、全体的に、波エネルギー吸収率を上げると浮消波堤の各動揺成分の動揺量は減少する傾向にある。また、浮体幅が広くなるにつれて、スウェイとロールは短周期側で小さく、逆に長周期側で大きくなり、ヒープは波周期6sで大きくなっている。これらの浮消波堤の動揺特性と図-5.7の浮消

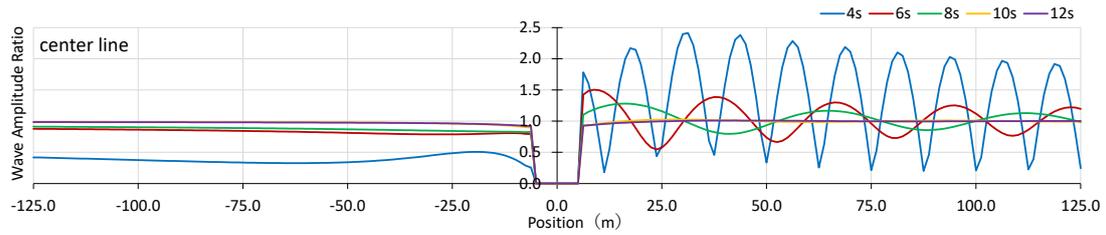
波堤背後の平均波高との関連性はあまり明確ではなく、浮体幅の影響を受けた浮消波堤周りの回折波が関係しているものと推測される。

#### 5.4 波力発電装置の波浪低減効果（浮体喫水の影響）

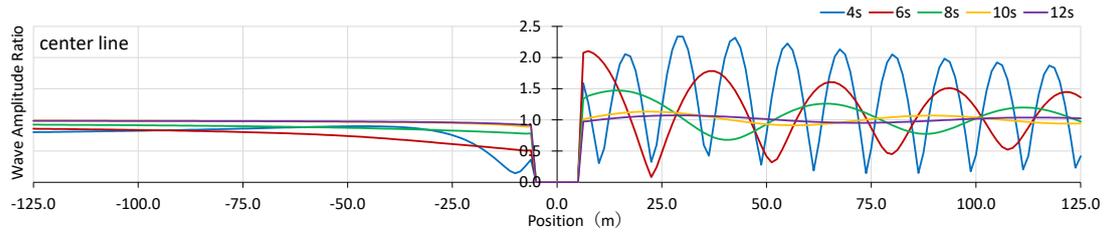
波力発電装置の波エネルギー吸収による波浪低減効果について、浮消波堤（単数）の浮体喫水の影響を考慮して比較する。

##### (1) 浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布

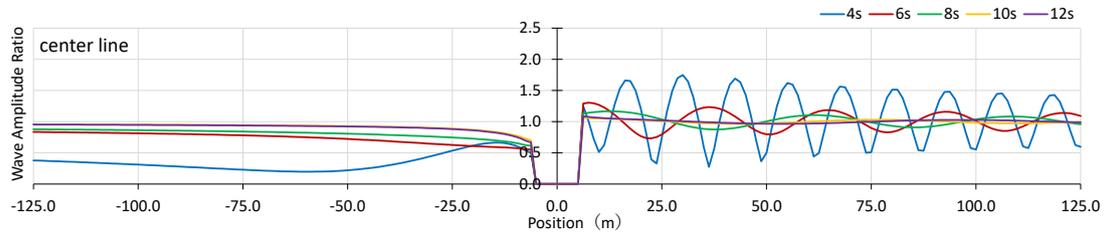
浮消波堤の波向方向におけるセンターライン（y軸）上の断面波高分布について示す。図-5.9は、Case AおよびCase A”における装置なしおよび75%吸収の場合の断面波高分布を示したものである。横軸はy軸方向の位置であり、縦軸は波振幅比（波高比）である。装置なしの場合、浮体喫水の深いCase A”において、浮消波堤の背後の波高が



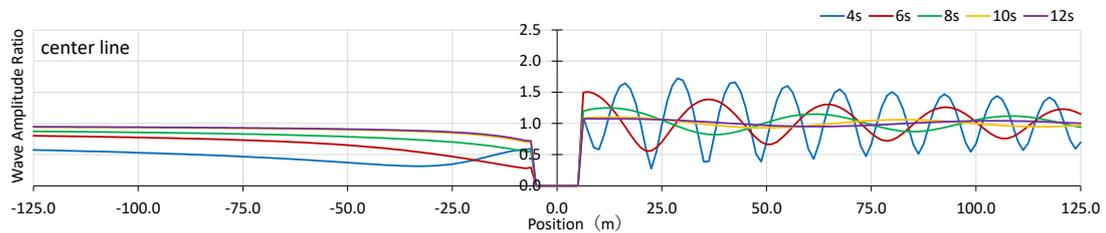
(a) 装置なし (Case A)



(b) 装置なし (Case A')



(c) 75%吸収 (Case A)



(d) 75%吸収 (Case A')

図-5.9 浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布 (Case A, Case A')

低減するはずである。しかしながら、波周期6sのときの波高が低減しており、波周期4sのときは逆に波高が増加し、これら以外の波周期では波高はあまり変わらない。一方、75%吸収の場合は、波力発電装置の波エネルギー吸収により、装置なしの場合よりも消波堤背後の波高が全体的に低減している。また、Case AよりもCase A'のほうが、波高が大きく低減している傾向にある。

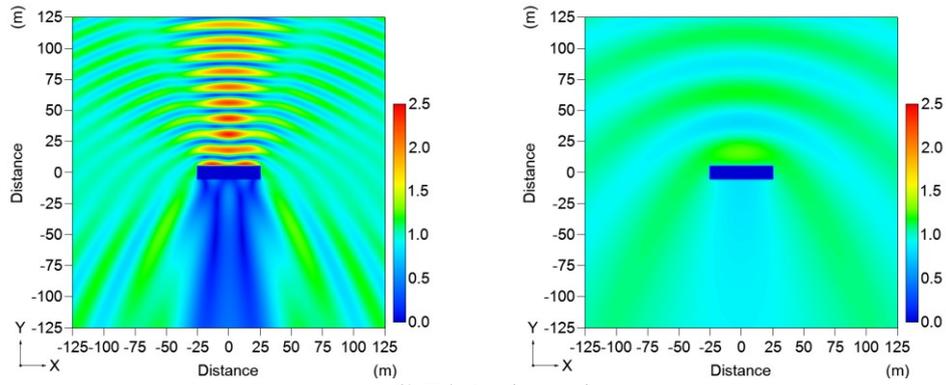
### (2) 浮消波堤周りの平面波高分布

浮消波堤の周辺海域の平面的な波高分布について示す。図-5.10は、Case AおよびCase A'における装置なしおよび75%吸収の場合の平面波高分布を示したものである。左図は波周期4sの場合であり、右図は波周期8sの場合である。また、波高分布は、図-5.9と同様に波振幅比(波高比)で表している。装置なしの場合は、Case A'の波周期4sのと

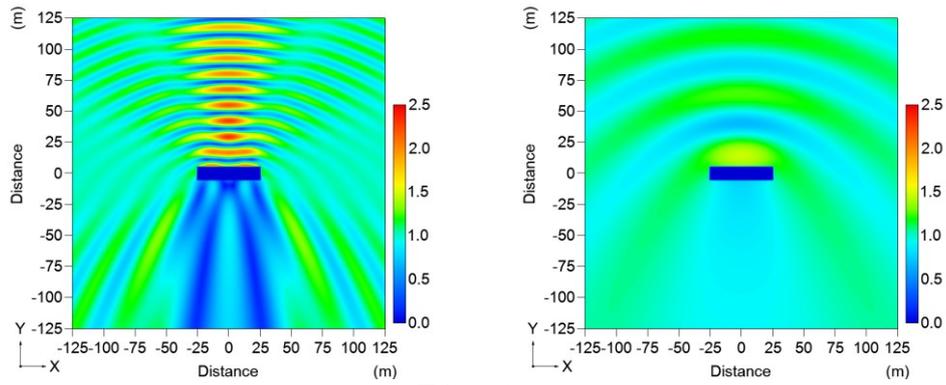
きに浮消波堤の背後で波高が増加しているのが見て取れる。一方、波周期8sのときは、浮体喫水の深いCase A'のほうが若干波峰は明確であるが、浮消波堤背後の波高の違いはそれほど明瞭ではない。すなわち、装置なしの場合は、これらの波周期では浮体喫水を深くしても大きな波浪低減効果は得られていない。また、75%吸収の場合は、装置なしの場合と比べて、浮消波堤の前方の波高が低減しており、波周期4sのときは浮消波堤の背後の波高も低減しているのが明らかである。加えて、波周期8sのときは、浮消波堤背後の波高が低下している範囲も広がっている。波力発電装置の波エネルギー吸収による有効性を示す一つの証左であると言える。

### (3) 浮消波堤の背後海域における平均波高

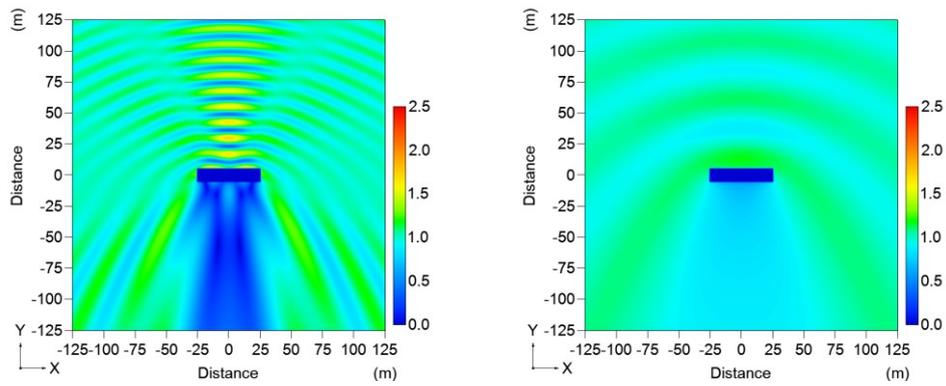
浮消波堤からある程度離れた背後海域における平均波



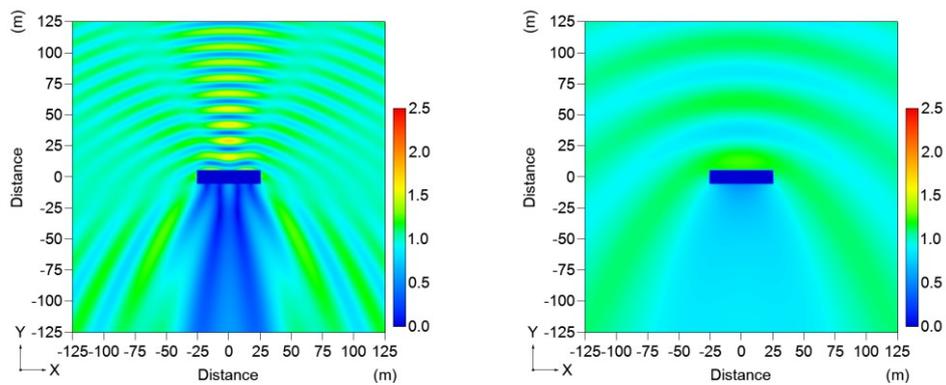
(a) 装置なし (Case A)



(b) 装置なし (Case A')

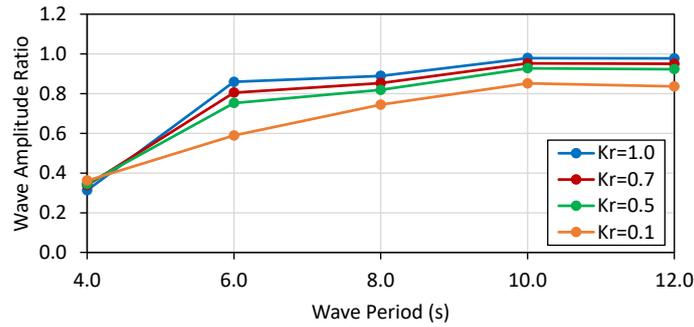


(c) 75%吸収 (Case A)

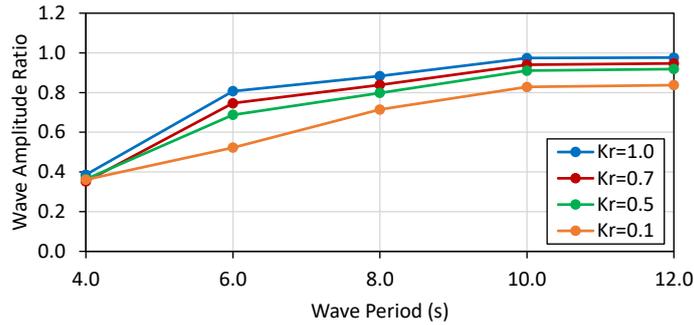


(d) 75%吸収 (Case A')

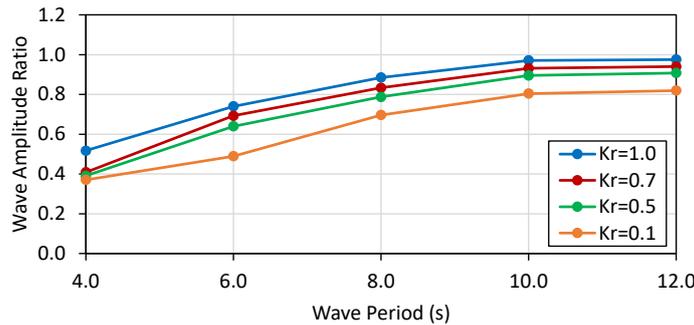
図-5.10 浮消波堤周りの平面波高分布 (Case A, Case A')  
(左: 波周期 4s, 右: 波周期 8s)



(a) Case A



(b) Case A'



(c) Case A''

図-5.11 浮消波堤の背後海域における平均波高 <浮体喫水による影響の比較>

高について示す。図-5.11は、Case A, Case A'およびCase A''における波力発電装置の波エネルギー吸収率ごとの平均波高を比較して示したものである。横軸は波周期であり、縦軸は波振幅比（波高比）である。いずれのケースでも、波エネルギー吸収率を上げることにより、波浪低減効果が大きくなる傾向にあるが、99%吸収の場合に大きな効果を得ることができている。Case A'では、Case Aと比べると、波周期6sのときに波高比が最大で0.1程度低下しているが、他の波周期では波高比にほとんど差異がない。また、Case A'とCase A''を比較しても、波エネルギー吸収の影響は波周期6s以下のときに見られ、長周期側では波高比にほとんど違いが見られない。すなわち、全体的には、波力発電装置の有無にかかわらず、浮体喫水の深いCase A''の場合に、短周期側で波浪低減効果が大きくなる傾向にあると言える。また、波力発電装置の効果については、波浪低

減効果の大きいCase A''において、99%吸収の場合に波高比が波周期6sで0.5程度、また波周期8sで0.7程度となっている。これらのことから、浮体幅の影響に関する考察のときと同様に、波力発電装置の波エネルギー吸収率を75%よりもかなり高くしないと大きな波浪低減効果を見込めないと考えられる。

#### (4) 浮消波堤の動揺量

入射波が作用することによって発生する浮消波堤の動揺量について示す。図-5.12は、Case A, Case A'およびCase A''における波力発電装置の波エネルギー吸収率ごとの浮消波堤の動揺量を比較して示したものである。左図はスウェイ、中央図はヒープ、また右図はロールである。横軸は波周期、縦軸は各動揺成分の動揺量の無次元値である。各ケースにおいて、波周期10sおよび12sの一部を除き、全体的に、波エネルギー吸収率を上げると浮消波堤の各動

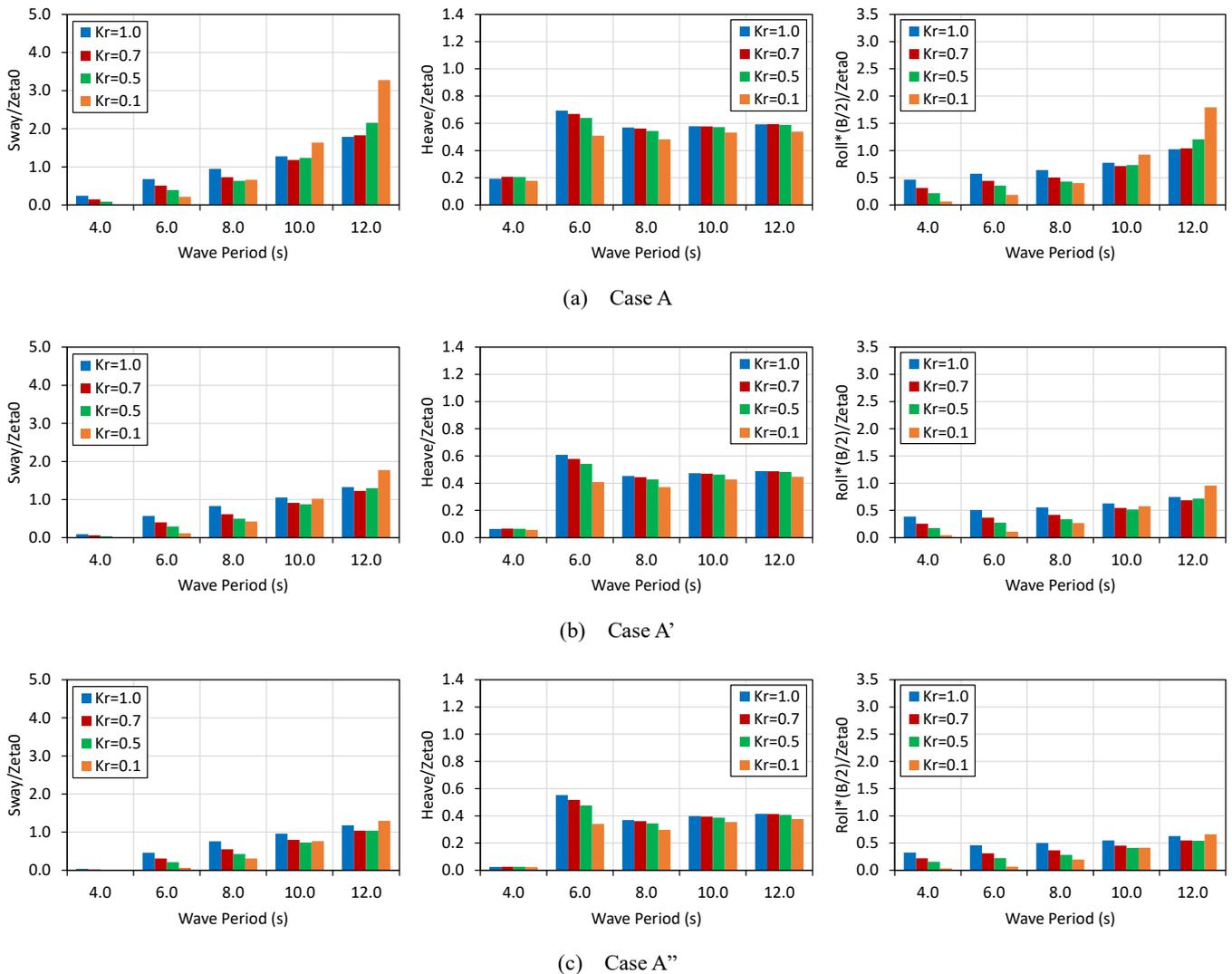


図-5.12 浮消波堤の動揺量  
 <浮体喫水による影響の比較>  
 (左：スウェイ，中：ヒープ，右：ロール)

揺成分の動揺量は減少する傾向にある。また、浮体喫水が深くなるにつれて、全ての動揺成分の動揺量は減少している。これらの浮消波堤の動揺特性と図-5.11の浮消波堤背後の平均波高を見比べると、長周期側では、浮体喫水が深い場合に浮消波堤の動揺量が小さい影響が現れていない。これは、浮消波堤周りの回折波が、浮体喫水の増加に伴って変化することが一因として考えられる。

### 5.5 波力発電装置の波浪低減効果（浮体長さの影響）

波力発電装置の波エネルギー吸収による波浪低減効果について、浮消波堤（単数）および浮消波堤（複数）の浮体長さの影響を考慮して比較する。

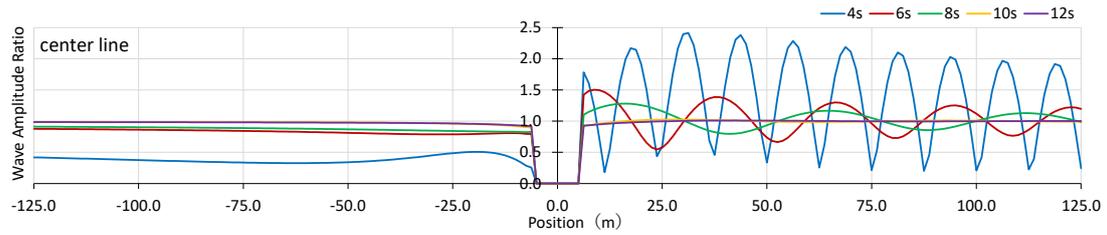
#### (1) 浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布

浮消波堤の波向方向におけるセンターライン（y軸）上の断面波高分布について示す。図-5.13は、Case A1および

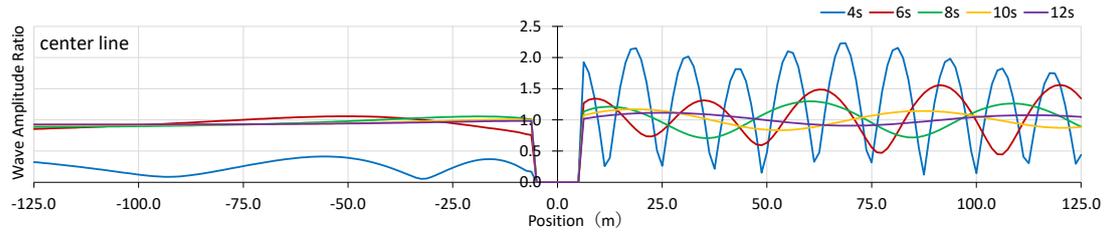
Case A3における装置なしおよび75%吸収の場合の断面波高分布を示したものである。横軸はy軸方向の位置であり、縦軸は波振幅比（波高比）である。ここで、Case A1は、Case Aと同一のケースである。装置なしの場合は、浮消波堤（複数）である浮体長さの長いCase A3では、浮消波堤（単数）のCase A1と比べて、波周期6sおよび8sのときに浮消波堤の背後の波高が増加しており、長周期側の波周期では波高はあまり変わらない。一方、75%吸収の場合は、波力発電装置の波エネルギー吸収により、装置なしの場合よりも浮消波堤の背後の波高が全体的に低減している。しかしながら、Case A3では、特に長周期側において浮消波堤の直背後付近で波高の上昇があり、Case A1とは異なった波形形状を示している。

#### (2) 浮消波堤周りの平面波高分布

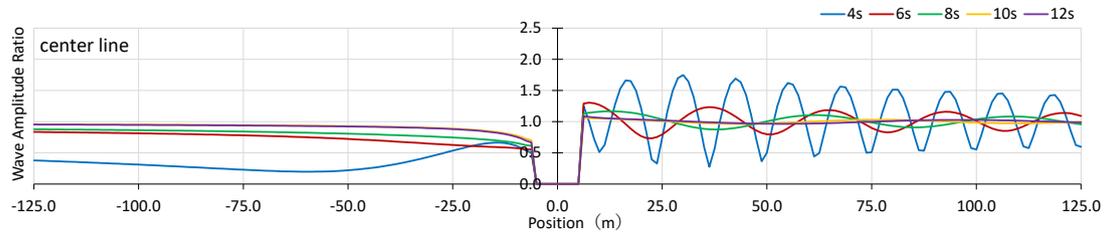
浮消波堤の周辺海域の平面的な波高分布について示す。



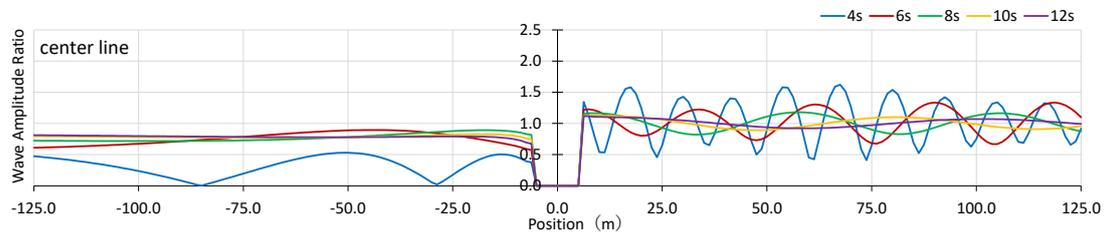
(a) 装置なし (Case A1)



(b) 装置なし (Case A3)



(c) 75%吸収 (Case A1)



(d) 75%吸収 (Case A3)

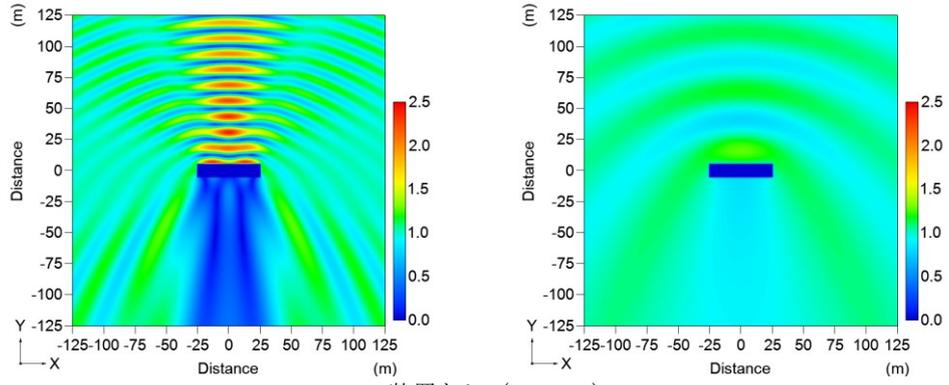
図-5.13 浮消波堤のセンターライン上の断面波高分布 (Case A1, Case A3)

図-5.14は、Case A1およびCase A3における装置なしおよび75%吸収の場合の平面波高分布を示したものである。左図は波周期4sの場合であり、右図は波周期8sの場合である。また、波高分布は、図-5.13と同様に波振幅比（波高比）で表している。Case A3では、浮消波堤の背後の入射波に対する遮蔽域がCase A1と比べて拡大している。装置なしの場合は、Case A3の波周期4sのときに浮消波堤の背後で波高の上下変化が斑状に広く分布している。一方、波周期8sのときは、Case A3において、浮消波堤の中心部分の直背後あたりで波高の盛り上がりが見られ、Case A1よりも背後海域における波高が増加する傾向にある。つまり、浮消波堤（複数）の場合には、浮消波堤（単数）よりも波浪に対する背後の遮蔽域は広がるが、波周期によっては波浪低減効果が得られない可能性があると考えられる。ま

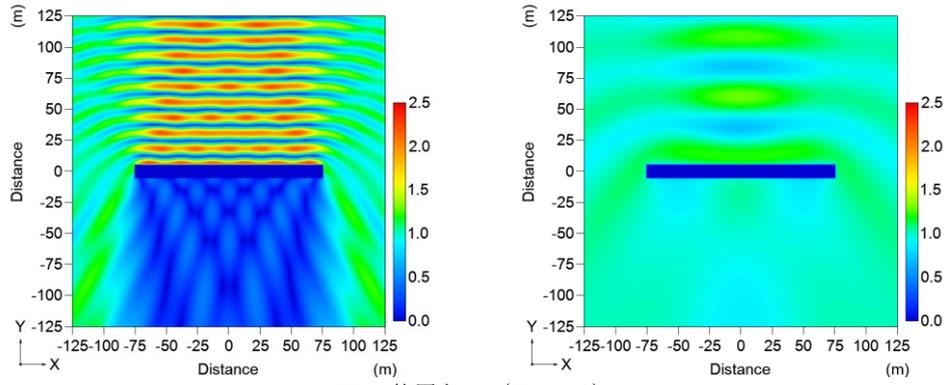
た、75%吸収の場合は、装置なしの場合と比べて、浮消波堤の前方の波高が低減しており、波周期8sのときは浮消波堤の背後の波高も低減している。その一方で、Case A3で波周期4sのときは、浮消波堤の背後の波高は若干増加しているように見える。

### (3) 浮消波堤の背後海域における平均波高

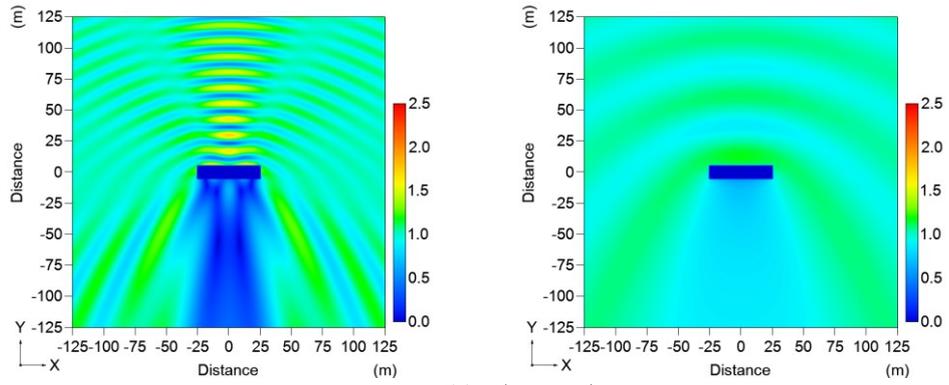
浮消波堤からある程度離れた背後海域における平均波高について示す。図-5.15は、Case A1, Case A2およびCase A3における波力発電装置の波エネルギー吸収率ごとの平均波高を比較して示したものである。横軸は波周期であり、縦軸は波振幅比（波高比）である。いずれのケースでも、波エネルギー吸収率を上げることにより、波浪低減効果が大きくなる傾向にあるが、浮消波堤（複数）であるCase A2およびCase A3においてその傾向が顕著である。ま



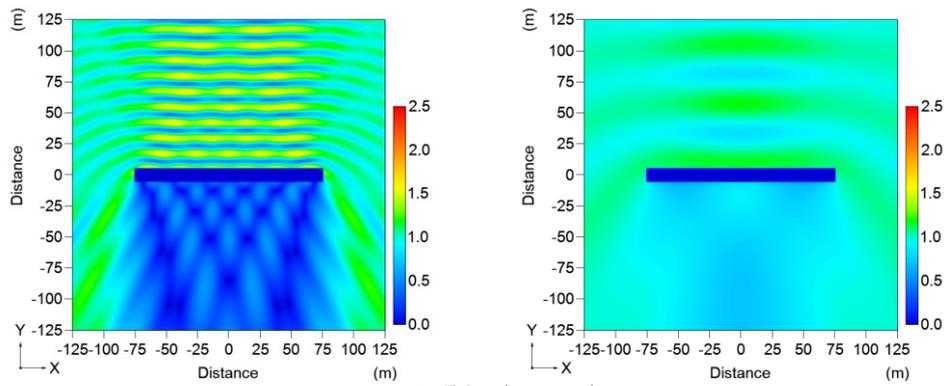
(a) 装置なし (Case A1)



(b) 装置なし (Case A3)

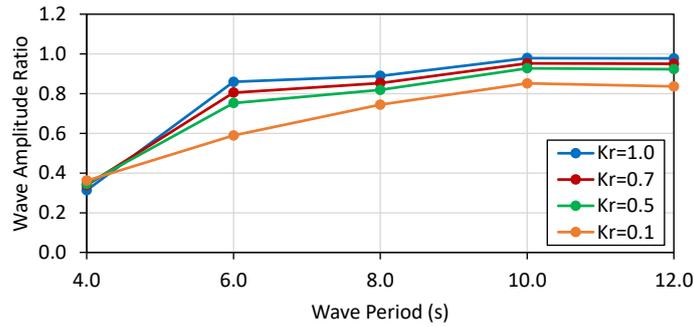


(c) 75%吸収 (Case A1)

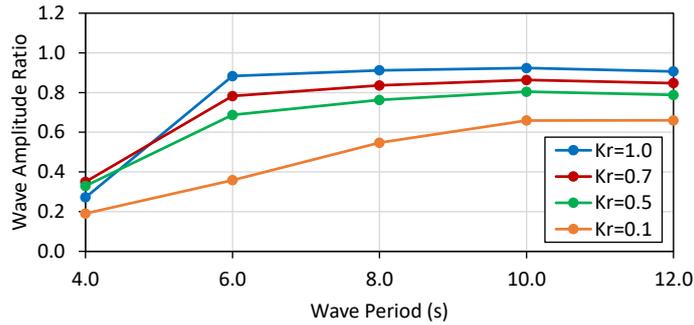


(d) 75%吸収 (Case A3)

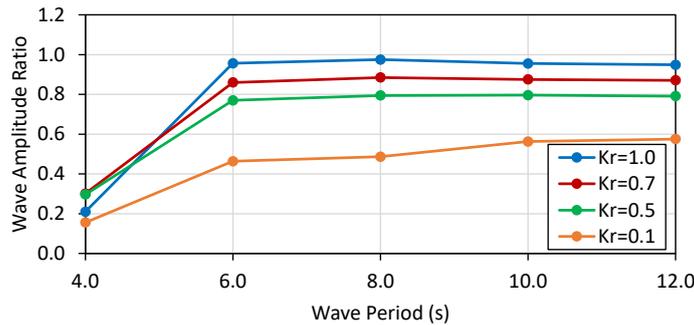
図-5.14 浮消波堤周りの平面波高分布 (Case A1, Case A3)  
(左: 波周期 4s, 右: 波周期 8s)



(a) Case A1



(b) Case A2



(c) Case A3

図-5.15 浮消波堤の背後海域における平均波高  
＜浮体長さによる影響の比較＞

た、Case A2とCase A3の比較では、波エネルギー吸収率によっては、特に短周期側で浮体長さの短いCase A2のほうで波浪低減効果が大きくなっている。一方で、Case A3では、例えば、99%吸収の場合には、波周期10s以上において波高が0.6以下となり、主に長周期側の波浪に対する低減効果が期待できる。しかしながら、Case A3で75%吸収の場合には、波周期6s以上における波高比は0.8程度となっている。これらのことから、浮消波堤（複数）の場合には、波力発電装置の波エネルギー吸収率を75%よりもかなり高くすることが可能であれば、大きな波浪低減効果を得ることができると考えられる。

#### (4) 浮消波堤の動揺量

入射波が作用することによって発生する浮消波堤の動揺量について示す。図-5.16は、Case A1、Case A2およびCase A3における波力発電装置の波エネルギー吸収率ごと

の浮消波堤の動揺量を比較して示したものである。左図はスウェイ、中央図はヒープ、また右図はロールである。横軸は波周期、縦軸は各動揺成分の動揺量の無次元値である。各ケースにおいて、波周期10sおよび12sの一部を除き、全体的に、波エネルギー吸収率を上げると浮消波堤の各動揺成分の動揺量は減少する傾向にある。一方で、各動揺成分の動揺量は、Case A1、Case A2およびCase A3の全てのケースで概ね同じ値となっている。これらのケースでは、波向に対する浮消波堤の断面形状が同一であり、また単体の浮消波堤（単数）を基数倍した係留方式であるため、2次元断面上では、同じ浮体構造物としての動揺特性を示していると考えられる。また、これらの浮消波堤の動揺特性と図-5.15の浮消波堤背後の平均波高との関連性は明確ではなく、浮消波堤の動揺に加えて、その浮体長さによる回折波の影響も受けているものと推測される。

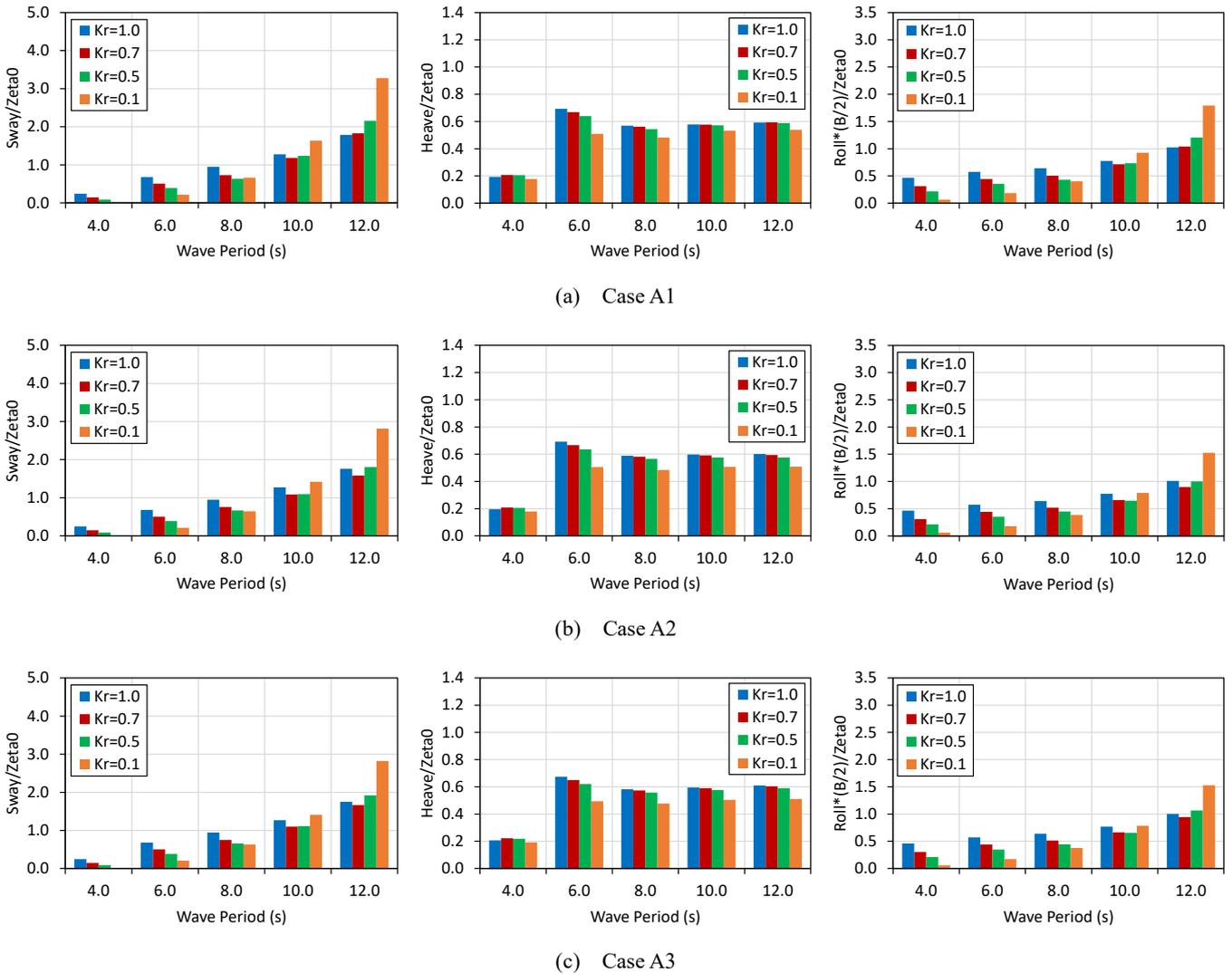


図-5.16 浮消波堤の動揺量  
 <浮体長さによる影響の比較>  
 (左：スウェイ，中：ヒープ，右：ロール)

## 6. 結論

本研究では、振動水柱型波力発電装置を搭載した浮消波堤として「波力発電浮消波堤」を提案し、波力発電装置の波エネルギー吸収による浮消波堤の背後海域における波浪低減効果について、3次元ポテンシャル接続法に基づく浮体動揺計算により検証した。

本研究の主な結論は、以下の通りである。

- 1) 波力発電浮消波堤の背後海域の一定範囲における平均波高から、全体的傾向として、入射波の波周期が短い場合、剛な係留方式の場合、また波力発電装置の波エネルギー吸収率が高い場合に浮消波堤の波浪低減効果が大きいことを確認した。
- 2) 波力発電装置による波エネルギー吸収率が75%よりもかなり高くないと、浮消波堤の背後海域において十分な

波浪低減が見込めないことがわかった。

- 3) 波力発電浮消波堤の形状や係留方式の構成によって、その動揺特性やその周囲の回折波が変化するが、対象とした浮消波堤の形状の範囲では、幅、喫水および長さが背後海域の平均波高に与える影響はあまり大きくないことが判明した。

## 7. おわりに

本研究では、波力発電浮消波堤の波浪低減効果を検証するために、浮体動揺計算による基礎的な検討を実施した。今後は、波力発電浮消波堤の具体化に向けて、波力発電浮消波堤の形状や係留方式、発電機構などに関する技術開発的研究を進めることが重要である。

(2021年6月4日受付)

## 参考文献

- 荒見敦史・河野豊・高木儀昌 (2006) : 内部水流振動型浮消波堤の設計と台風災害時の被災状況—鹿児島県幣串地区—, 水工研技報, 第28号, pp.33-39.
- 池上国広・尾崎雅彦・磯崎芳男 (1994) : 外海型浮消波堤の開発, 三菱重工技報, Vol.31, No.1, pp.45-48.
- 居駒知樹・増田光一 (2013) : 海洋再生可能エネルギーからの電力の獲得—波力発電—, 日本海水学会誌, 第67巻, 第2号, pp.76-84.
- 井島武士 (1974) : 有限水深域の構造物および浮体による波の変形 (2次元および3次元問題), 土木水工学シリーズ74-B-3, pp.1-32.
- 上田茂・白石悟 (1980) : 大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究 (第2報) —数値シミュレーション手法について—, 港湾技術研究所報告, 第19巻, 第3号, pp.105-143.
- 門野明 (1992) : 浮消波堤の経年後実情調査, 水産工学, Vol.28, No.2, pp.135-140.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2014) : NEDO再生可能エネルギー技術白書 (第2版) 「第6章海洋エネルギー」, 84p.
- 鈴木正己 (2015) : 振動水柱型波力発電システム, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第50巻, 第1号, pp.42-47.
- 高木儀昌 (1996) : 浮消波堤による養殖場沖合化の取り組み, 日本造船学会誌, 第809号, pp.805-809.
- 高木儀昌・森口朗彦・吉村拓・清本節夫 (2005) : 浮消波堤で観察された有用な動物, 水工研技報, 第27号, pp.29-41.
- 爲廣正起・辻田孝・土岐直二 (1977) : 動揺制御式浮消波堤の消波性能, 海岸工学講演会論文集, 第24巻, pp.281-284.
- 永田修一 (2015) : 浮体式波力発電システム, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第50巻, 第1号, pp.48-53.
- 長野章・大塚浩二・岡部俊三・佐井正明 (1991) : 漁港における浮体式構造物 (けい船岸、防波堤) の開発と建設, 海洋開発論文集, Vol.7, pp.65-70.
- 日本造船学会海洋工学委員会性能部会 (2003) : 実践 浮体の流体力学 前編—動揺問題の数値計算法, 成山堂書店, 291p.
- 前田久明・山下誠也 (1982) : 波浪エネルギー—一次変換装置, 日本造船学会誌, 第637号, pp.306-327.
- 鷺尾幸久 (1999) : 波力発電—「海明」から「マイティール」へ—, 日本船用機関学会誌, 第34巻, 第11号, pp.732-740.

- 鷺尾幸久・大澤弘敬・永田良典・藤井文則・古山裕喜・藤田俊助 (2000) : 沖合浮体式波力装置「マイティール」実海域実験 その1 実験システム概要及び係留設置工事, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第40号, pp.1-17.
- 鷺尾幸久・大澤弘敬・緒方輝久・中川寛之・岡山修三・永田良典 (2001) : 沖合浮体式波力装置「マイティール」の発電出力, 日本造船学会論文集, 第190号, pp.395-405.

## 記号表

- $d$  : 浮体の喫水 (m)
- $f_0(x, y)$  : 入射波に対する速度ポテンシャル
- $f_1(x, y) : \Phi_1(x, y, z)$  の式の未定係数
- $f_2^{(m)}(x, y) : \Phi_1(x, y, z)$  の式の未定係数 (無限級数項)
- $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)
- $h$  : 水深 (m)
- $i$  : 虚数単位
- $K_d$  : 領域 1 における波振幅と入射波振幅の比 (波振幅比)
- $K_r$  : 浮消波堤の前面の波反射率
- $k$  : 波数 (m<sup>-1</sup>)
- $k_n$  : 式  $-k_n h \tan k_n h = \sigma^2 h / g$  の根
- $M$  : 浮体の底面のパネルの数 (枚)
- $N$  : 浮体の平面形状境界線のセグメントの数 (個)
- $n$  :  $\Phi_1(x, y, z)$  の式の無限級数項の項数
- $n^*$  :  $\Phi_1(x, y, z)$  の式の無限級数項の項数 (最大値)
- $s$  :  $\Phi_2(x, y, z)$  の式の無限級数項の項数
- $s^*$  :  $\Phi_2(x, y, z)$  の式の無限級数項の項数 (最大値)
- $\bar{s}$  :  $\Phi_2(x, y, z)$  の式の係数 ( $=s\pi/(h-d)$ )
- $t$  : 時間 (s)
- $x$  : 浮体の長軸方向の座標 (m)
- $y$  : 浮体の短軸方向の座標 (m)
- $z$  : 浮体の鉛直方向の座標 (水面からの深さ) (m)
- $\zeta$  : 入射波 (m)
- $\zeta_0$  : 入射波の振幅 (m)
- $\theta$  : 波向 ( $x$  軸の正方向から反時計回り) (°)
- $\pi$  : 円周率
- $\sigma$  : 角周波数 (rad/s)
- $\Phi_1(x, y, z)$  : 領域 1 の速度ポテンシャル
- $\Phi_2(x, y, z)$  : 領域 2 の速度ポテンシャル
- $\varphi_0(x, y) : \Phi_2(x, y, z)$  の式の未定係数
- $\varphi_s(x, y) : \Phi_2(x, y, z)$  の式の未定係数 (無限級数項)

港湾空港技術研究所資料 No.1385

2021.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。