# 浮体式構造を想定した鉛直混合促進装置の開発に関する基礎的研究

Basic Study on Development of Vertical Mixing Devices as a Floating Body

中村孝幸<sup>1</sup> · 塚原靖男<sup>2</sup> · 日高達也<sup>3</sup>

# Takayuki NAKAMURA, Yasuo TSUKAHARA and Tatsuya HIDAKA

The final goal of this study is to develop a floating device for improvement of the sea environment in a semi-enclosed bay, which is driven by renewable wave energy. As a first step of such a study, under the assumption that the floating device was fixed to the water surface, various cross sections of the floating device were examined to find out an effective cross section for vertical mixing of sea water in comparatively deep sea. The major driving force of a device for vertical mixing of sea water is the piston mode wave motions in the water chamber located at the center of the body. Additional functions of the device, such as dissipations of reflected and transmitted waves were also examined. It was found out that the asymmetry cross section with a horizontal connecting channel only in offshore side to a vertical water chamber was most effective.

# 1. はじめに

我が国では、内湾域を中心に魚類養殖や真珠養殖など の海面養殖が盛んに行われている.しかしながら、過剰 な養殖施設の設置や海域への富栄養化水の流入などによ り、内湾域の水質悪化は進んでおり、赤潮などの発生も 頻繁に報告されるようになってきている.閉鎖性の内湾 域における水質改善を目的とした従来の研究では、金山 ら(2004)により、電気エネルギーを原動力として酸素 濃度の低下した底層に直接酸素を供給する手法が提案さ れている.この手法の特徴としては、高い水質改善効果 が期待できるが、装置のランニングコストが高価である ことや持続性に乏しいことなどの問題点が指摘されてい る.一方、佐伯・中村(2008)は、常時波浪を駆動力と する遊水室型の鉛直混合促進型護岸を提案し、この護岸 により海域の鉛直混合効果や反射波の低減効果などが得 られることを実験と理論の両面から明らかにしている.

本研究は,このような内湾域の水質浄化を進める工法 として,やはり自然エネルギーである波運動を利用する 浮体式の海域環境改善施設の開発を最終的な目標として いる.

特にここでは、このような浮体式施設の開発を進める ための第一歩として、施設が水面に仮想的に固定されて いる状態を想定して、より効果的な鉛直混合機能を有す る構造体の基本断面について模索を行い、その効果につ いて明らかにする.この際、鉛直混合のための駆動力に は、常時波浪の条件下でも活用できるように、水中振動 型遊水室のピストンモード波浪共振を利用する.具体的

1	正会員	工博	愛媛大学大学院 理工学研究科
2		工修	三井造船(株) 大分鉄構運搬機工場
3	正会員	学(工)	日本工営(株)



鉛直混合メカニズム

沖側開口部より遊水室に水穂が流入
遊水室でピストンモードの波浪共振の発生
沖側構造体下端での渦流れにより鉛直流を引き起こす

には図-1に示すような構造体中央部に遊水室を有し、そ の前後には浮体式構造へ展開した際に浮力体となる構造 が採用してある.原理的には、構造体中央部の遊水室内 の波浪共振に伴う強い渦流れの生成を利用して平均流を 引き起こし、周辺海域の鉛直混合を促進するものである. そして、ピストンモードの波浪共振や渦流れの発生状況 と密接に関係すると考えられる、構造体まわりの波変形 や波のエネルギー逸散の状況などについても付随的に明 らかにする.

# 2. 実験装置および実験方法

# (1) 実験装置

実験には、図-2に示す二次元造波水槽を用いた.この 水槽は、長さ30m×幅1m×高さ1.25mの規模で、水路内 には1:30の勾配のスロープを設けてある.なお図中に は模型堤体の設置位置と波高計の設置位置を併せ示して ある.水路の水平床部分には,水路を2分するように隔 壁を設置し,一方では入射波を,他方では模型堤体を設 置し,入射波および透過波を同時に測定できるようにし た.この水槽の一端にはピストン型造波装置が,他端に は砕石およびヘチマロンよりなる透過型の消波工が設置 されている.また,消波工部分の隔壁は一部を解放し, 模型堤体の効果による平均流が発生した場合でも堤体前 後に水位差が生じ難い構造としてある.実験では,波変 形の計測と同時にトレーサーを用いた流れの可視化を行 い,ビデオカメラによる流況観測も併せて実施した.

#### (2) 模型堤体

水中振動型遊水室のピストンモード波浪共振を利用で きる構造体として、図-3(a) ~ (c) の3種類の断面を提 案した.これらのモデルでは、浮体式構造へと展開する とき、十分な浮力が確保できるように各構成部材が浮力 体としての役割を果たすようにしてある.これらの堤体 は開口部では沖側から岸側の水平方向流れにより遊水室 内へ水塊が運ばれ、遊水室内のピストンモードの波浪共 振により通水路で鉛直方向の流れが発生することを期待 した構造である.

図-3(a) では静的な釣り合い状態が容易に得られるように左右対称の構造としてある.

図-3(b)の堤体は,遊水室内の波浪共振を効果的に発 生させるために左右対称型の堤体の岸側の開口部を無く した構造である.

図-3(c)の堤体は、遊水室内の下向きの流れを増幅させるために遊水室内にフィンを設けた堤体である.いずれの模型もその縮尺は、1/11程度を想定した.

なお、これら構造体の断面の諸元を決定するに当って は、減衰波理論(中村・井手、1997)による理論算定の 予備的な検討において、後述する想定した海域での波浪 条件の範囲内で反射波の低減効果と遊水室内のピストン モードの波浪共振の生起に関係する波高増幅率に着目し た.これは、波高増幅率の増大および反射率の低下が、 遊水室内でのピストンモード波動運動の強化およびそれ に伴う渦流れの発生と密接に関係すると考えたことによ る.そして、鉛直方向の平均流は、このピストンモード 波動運動と渦流れの強度および生成状況に関係して発生 すると考えられる.すなわち、波運動による鉛直混合が 顕著になるための必要条件として、駆動力に関係する遊 水室内の波高増幅率が大きいこと、非振動流を生起する ため強い渦流れが発生し、反射波などの低減効果が大き くなることを仮定したものである.

#### (3) 計測方法

a) 波変形の計測

波変形の計測は、図-2に示す位置に6台の容量式波高 計を設置した.模型堤体の沖側には、沖波計測用に1台、 入・反射の分離用に2台、透過波の計測用に1台、堤体 の遊水室内における波高の計測用に1台、模型堤体横の 回流用水路にも入射波測定用に1台設置した.なお、反 射率の推定には、合田ら(1976)の入・反射波の分離推 定法を用いた.

#### b) 流速の計測

通水口における流速は、1台の電磁流速計を用いて、 図-3中に示す位置にて計測した.

#### (4) 実験条件

実験で用いた波条件は、静穏な内湾域における常時波









図-3 鉛直混合促進型堤体および模型断面

浪を想定して,入射波高H = 5cm (現地量でHp = 0.5m程度),周期T =  $1.0 \sim 1.8s$  (現地量でほぼTp= $3 \sim 6s$ の範囲) の規則波を用いた.水深hは,全ての実験においてh = 60cm(現地量でhp = 7m程度)で一定としたが,これは 水槽の規模による制限を受けるためであり,実際には 30m以深の海域を目標としている.

## 3.実験結果および考察

## (1) 遊水室内の波高増幅率

図-4,5は、図-3に示した3種類の堤体の遊水室内にお ける波高増幅率Hc/Hの実験結果および減衰波理論による 算定結果を周期のパラメーターである波長遊水室幅比 L/Bwによる変化で示す.減衰波理論で必要となる等価線 形抵抗係数fcは,既往の研究成果(佐伯・中村ら,2008) および実験結果との整合性を考慮してfc=0.2とした. なお,想定した対象波の周期条件(Tp=3~6s)は, L/Bw=14~24の範囲に相当することを付記しておく.

左右対称のType1の堤体では,L/Bw=18付近で波高増 幅率Hc/H=2強程度.の極大値を示す.また,左右非対称 の堤体および遊水室内に下向きのフィンを設けた堤体 (Type2,3)では,それぞれL/Bw=20付近および33で, Hc/H=3.5程度と非常に高い値を示す.このように波高増 幅率が極大を示すのは,遊水室内におけるピストンモー ドの波浪共振の生起によるものである.

また, Type2とそれに下向きフィンを設けたType3で

は、波高増幅率に有意な差が見られず、遊水室下部の鉛 直通水路に障害物を設けてもピストンモードの波浪共振 の特性にはそれほど有意に影響しないものと推定され る. 左右対称の堤体 (Type1)に比べて、左右非対称の 堤体 (Type2)および遊水室内に下向きのフィンを設け た堤体 (Type3)の方が波高増幅率の高い算定結果およ び実験結果が得られたのは、沖側から水平通水路を介し て進入した水塊が岸側の構造体で遮られるため、遊水室 内部での波高増幅率が左右対称の堤体に比べて増加した ものと推測される.

波高増幅率に及ぼす作用波高の影響に着目すると、い ずれの堤体においても、増幅率がピークを示す付近で多 少ながら差異が認められる.特に、非対称構造のType2, 3では、作用波高の低いときに増幅率が大きくなる傾向 が見られる.これは相対的な散逸エネルギーが小さくな るためと考えられる.

#### (2) 平均輸送流量および鉛直極大流速

図-6,7は、図-3に示した3種類の堤体の鉛直通水路に おける波一周期間当りの平均輸送流量Qを示す.図中で は、波運動による半周期間の移動水塊量HL/2πで除した 無次元平均輸送流量Q\*を波長遊水室幅比L/Bwによる変 化で示す.また図-8~10は、各堤体について平均輸送流 量に関係のある通水路における鉛直方向の極大流速vを πH/Tで除した無次元極大流速v\*のL/Bwによる変化で 示す.Type1の左右対称の堤体では、図-6に見られるよう







図-10 Type3の通水路における無次元鉛直流速v\*

に、遊水室内の波高増幅率がピークを示す条件下(L/Bw = 22付近)で正方向(鉛直上向き)への平均流量が見ら れ,作用波高が大きくなると増加する傾向を示す.これ は、岸側開口部より遊水室内に水塊が流入して遊水室側 開口部のハンチ部で上向きの渦流れが発生して、遊水室 内で上向きの平均流が生成されることによるものと考え られる.ただし、長周期側になると下向きへの平均流量 に変化するなど、平均流の方向が一定でなく、鉛直混合 装置の性能として十分とは言い難い.このときの鉛直方 向の流速の極大値は、図-8に示すようにそれほど大きく なく、前述した遊水室内の波高増幅率の特性を反映して いるものといえよう.

左右非対称のType2の堤体は、上述したように遊水室 内の波高増幅率が大きいため、図-9に見られるように鉛 直方向の流速の極大値は大きいものの,正負の流速がほ ぼ等しいことが確認される.このため,この堤体による 平均輸送流量は,図-7に見られるように,波高の大小に 関係なく,ほとんどの周期条件下で小さい値を示す.た だし,遊水室内の波高増幅率が大きくなる周期条件では, 沖側構造体下端の鉛直版で下向きの渦流れが発生しやす く,下向きの平均流が生成される傾向にあることも認め られる.しかし,この傾向は長周期の条件になると弱ま り,平均流はほとんど見られなくなる.

遊水室内に下向きのフィンを設けたType3の堤体では、 その平均輸送流量は、図-7に見られるように、作用波の 周期,波高に関係なく、鉛直下方向に有意な大きさであ ることが認められる.このことは、図-10に示す鉛直方 向の流速の極大値において、上向きに比べて下向き流速 が卓越した大きさを示すことからも確認できる.これは、 遊水室内の波高増幅率が高いことや、鉛直通水路に下向 きフィンを取り付けたことにより、順流時と逆流時の剥 離流れおよびそれの渦への巻き込み過程の非対称性が強 く現われるようになり、安定して下向きの平均流が生成 されることによる.

#### (3) 波浪制御効果

#### a)反射率

図-11, 12は、図-3に示した3種類の堤体の反射率Crの 実験結果および減衰波理論による算定結果を周期のパラ メーターである波長遊水室幅比L/Bwによる変化で示す. 左右対称の堤体(Typel)では極小値が顕著に現れず,





波高H=5cm, 10cm共に,全ての周期において反射率 Cr=0.6~0.8と高い値を示す.これは,遊水室内の波高増 幅率が小さいために,エネルギーの散逸が少なく反射率 が高い値を示したものと推測される。

左右非対称の堤体 (Type2), 遊水室内に下向きのフィ ンを設けた堤体 (Type3) では, 波高H=5cm, 10cm共に, L/Bw=20付近で極小となり反射率Cr=0.3~0.4程度に低 下する。そしてこの極小周期帯の両側で反射率は上昇す る傾向にあり,実験結果と算定結果で大きな差異は見ら れない.反射率が一旦低下するのは,この周期帯が遊水 室内のピストンモード波浪共振点に対応することによる と考えられる.左右非対称の堤体 (Type2) に比べて遊 水室内に下向きフィンを設けた堤体 (Type3) の方が反 射率が小さい値を示したのは,フィンまわりに渦が発生 することにより,エネルギーがより強く散逸されるため と推測される.

## b)透過率

図-13, 14は、図-3に示した3種類の堤体の透過率Ctの 実験結果および減衰波理論による算定結果を周期のパラ メーターである波長遊水室幅比L/Bwによる変化で示す.

左右対称の堤体 (type1) は,左右非対称の堤体 (Type2) および遊水室内に下向きのフィンを設けた堤体 (Type3) より1~2割程度高い結果となる.これは、沖側の開口部 から入った波がそのまま岸側の開口部を抜けていくこと によるものと考えられる.また,波高H=5cm,10cmによ る差異はなく,算定結果と実験結果を比べると,長周期 側では算定結果より実験結果の方が低い値となることが 確認される.

左右非対称(Type2)と遊水室内に下向きのフィンを 設けた堤体(Type3)は岸側構造体に差異がないため, 透過率に有意な差が見られなかったものと推測される.



# 4. 結語

本研究は、鉛直混合機能を有する浮体式施設の開発を 目的に、第一段階の検討として施設が水面に固定されて いる状況を想定して、理論と実験より効果的な断面につ いて明らかにしてきた.本研究で得られた主要な結果を 取りまとめると以下のようになる.

- (1) 浮体式構造を想定して提案したモデルで、中央部に 遊水室があり、その前後に開口部をもつ対称構造のモ デルは、海面での安定が保持しやすい反面、有意な波 浪制御効果や鉛直通水路を介しての水塊輸送はほとん ど期待できない。
- (2)沖側にのみ開口部を設けた前後非対称のモデルは、 上記した対称構造のモデルに比較して、遊水室内にお けるピストンモード波浪共振の増幅度が大幅に増加す る.そして、このモデルの遊水室下部付近に下向きフ ィンを設けると、鉛直通水路を介して下向き方向への 水塊輸送が顕著になる.
- (3)沖側にのみ開口部を設けた前後非対称のモデルでは、 反射率・透過率の両者共に効果的に低減できる。この 低減効果は、鉛直下向き方向への水塊輸送の増加を目 的として設けた遊水室下部付近の下向きフィンの影響 をほとんど受けない。

# 参考文献

- 金山 進・佐々木洋之・佐々木 淳・岡田知也・春谷芳明・ 城野清治・廣海十郎・中瀬浩太 (2004):密度流を利用し た底層貧酸素対策装置の効果とその再現計算,海岸工学 論文集,第51巻, pp.1166-1171.
- 合田良実・鈴木保正・岸良安治・菊池 治 (1976):不規則波 実験における入・反射波の分離法,港湾技研資料, No. 248, pp. 3-24.
- 佐伯信哉・中村孝幸(2008):低反射式鉛直混合促進型護岸の 効果と循環流の発生機構について,海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1236-1240.
- 中村孝幸・井出善彦(1997):波の逸散現象を考慮した隅角物 体まわりの波変形と作用波力の算定法,海洋開発論文集, 第13巻, pp. 177-182.