

浮遊渚（円錐形状浮体）の消波特性 及び送水特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE WAVE ABSORBING CHARACTERISTIC AND THE WATER SUPPLYING CHARACTERISTIC OF THE FLOATING BEACH(FLOATING BODY OF CONIC SHAPE)

田中博通¹・長津安洋²・真鍋安弘³

Hiromichi TANAKA, Yasuhiro NAGATSU and Yasuhiro MANABE

¹ 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3丁目20番1号)

² 非会員 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3丁目20番1号)

³ 非会員 大洋プラント株式会社 (〒221-0835 神奈川県横浜市神奈川区鶴屋町2丁目19番地の4)

It developed the "floating beach" which has the floating breakwater and a pump feature in this research. The floating beach is composed of the convergence embankment which was radially spread from the center to the regular intervals to the cone slope, the skirt which was installed in the equipment lower part and hose for the flow of water which was stretched from the hole of the apex to the lower part. Experimentally this time, there is a hose to attenuate in the side of the equipment in the wave energy among floating bodies. Also, the wave which did an inclination board in the going against stream because a few apexes of the equipment central part went out of the surface of the water flows in to the hole on the equipment center and is the equipment the flow of water of which to the substratum is possible with the stretched hose in the lower part. That is, it is equipment with flow of water using the change operation on the potential energy of water from the kinetic energy of the wave. This research sought that the wave attenuated in which degree by the value with period and wave height about the case to have arranged the floating body in one line and the case to have arranged at the plover from the experiment. Moreover, when making the wave overtopping head of the floating body constant, it sought flow of water quantity by the value with period and wave height

Key Words : *Floating beach, wave absorbing, water supply, water quality improvement*

1. はじめに

2005年2月に京都議定書が発効し、CO₂排出量削減が批准国には義務付けられ、新エネルギーの技術の開発と経済性評価に関する研究が急務となってきた。

新エネルギーの中でも、太陽光、風力、地熱、小水力、バイオマスの利活用は実用化されているが、海洋エネルギーについては、海洋温度差発電だけがOTEC以来地道な研究により上原サイクル(佐賀大学)として実用化されているにすぎない。しかし、エネルギー賦存量としては膨大である海流、潮汐、波浪、塩分濃度差、海洋バイオマスについては、それほど実用化されていないのが現状である。我が国でも1984年¹⁾、1987年²⁾に海洋科学技術センター(現海洋開発研究機構)主催による波浪エネルギー利用シンポジウムが開催され数多くの研究が報告されたが、その後実用化に至らないのは、装置が大規模であることによる経済性とエネルギー効率が低いことによる費用対効果(B/C)が見込めないと判断による所が大きい。しかし、地球温暖化対策に対する国際社会の政策環境は一変し、いまこそ膨大な海洋エ

ネルギー開発を推進することが必要であるものと考えられる。ちなみに、田端等³⁾は、日本沿岸の波エネルギーの賦存量は全国平均で6kW/mと推定している。

そこで、著者等は、浮消波堤の機能と波エネルギーを利用したポンプ機能を兼ね備えた「浮遊渚」(円錐形状浮体)を開発している。⁴⁾図-1に示すように、浮遊渚は、円錐形の斜面に中央部より等間隔に放射状に延びた収斂堤と装置下部に取り付けられたスカート及び頂部の穴から下方に伸びた送水用のホースで構成されている。現象的には、装置への入射波を収斂、砕波、越波することとスカートによる水粒子運動エネルギーの散逸によって消波する機構である。また、装置中心部の頂部が水面より少し出る程度に浮遊させることにより、傾斜板を遡上した波が装置中央部の穴に流入し、下方に伸びたホースを通して下層への送水が可能な装置である。即ち、波の運動エネルギーから水の位置エネルギーへの変換作用を利用して送水する装置である。円錐形状であるため、波向に左右されず効率よく波を収斂することが出来るのが特徴である。その用途として、湾内の静穏化、海洋空間利用の確保、有酸素水の供給による養殖漁

場施設及び閉鎖性水域内の水質改善，小水力発電が期待される。

渚とは波打ち際のことであるが，あたかも斜面を遡上した波が斜面上で砕波する様子から通称「浮遊渚」と名付けた。

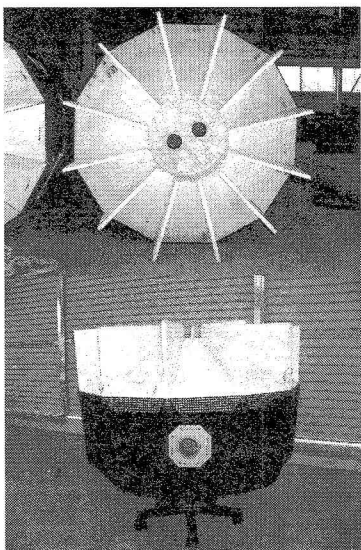
浮消波堤に属する「浮遊渚」は，生物付着，鎖の劣化，係留部の損傷等，荒天時における破損が懸念されるが，設置条件によってその規模，形状，配列等の融通性があること，水深や海底地形を問わず設置が可能であること，劣化・損傷した際の修理・交換が可能であるため維持・管理し易いこと，係留方式であるため海水交換ができ周囲の海域環境への影響が軽減できることなどの利点がある。

本研究は，前報⁴⁾と斜面勾配を変え，更に消波機能を高めるために浮体間に越波した水を左右に送水する機能付加して浮遊渚の消波特性と送水特性について実験を行い考察したものである。

2. 浮遊渚について

浮遊渚について説明する。

図-1 は，消波実験で使用した縮尺 1/25 の浮遊渚模型である。円錐形状で，傾斜板と装置の中央部より半径方向へある程度の間隔を保って放射上に延びた 12 枚の収斂堤と外周に沿って巻かれたスカート（仮称）で構成されている。また中央部内側に，浮遊物体を



中心部の頂点部が水面より少し出る程度に浮遊させる為に発泡スチロールを備え付けている。その為，傾斜板頂点部に激しい波の動揺作用が生じた場合でも，傾斜板や収斂堤に均等に力を分散させることが可能であり，入射波の方向性を問わない特徴を持っている。今回は図-1 に示すように，斜面を遡上し，頭頂部の柵に流入した水がスカートの左右側面に取り付けた放出口から流出することにより浮体間の波を減衰することを目的とした仕組みを考えた。

図-2 は浮遊渚模型の平面図と側面図であり，表-1 は実験で使用した浮遊渚の 1/25 模型の寸法である。前回の模型の斜面勾配は，1/2.62 であったが，今回の模型の斜面勾配は送水量を増加することを目的に前回よりも約 2 倍急勾配である 1/1.26 とした。

図-3 は，送水実験で使用した縮尺 1/17 の浮遊渚模型である。この模型は送水量特性を知ること

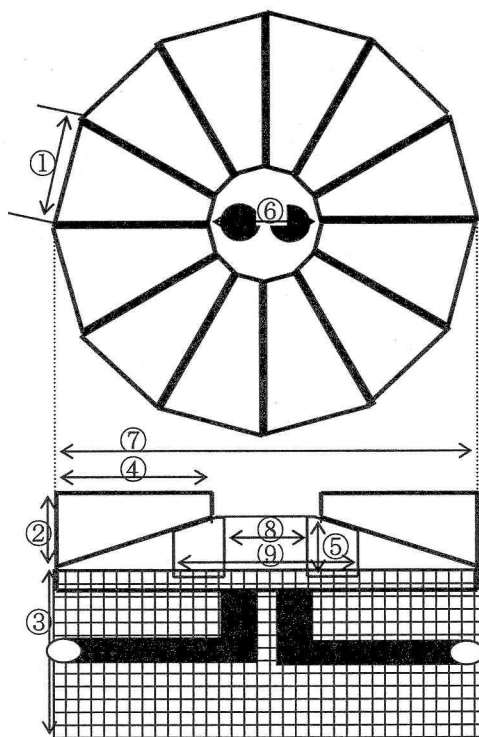


図-2 浮遊渚模型（上面・正面）（消波用）

表-1 浮遊渚模型寸法（消波実験用）

①	258	⑥	300
②	220	⑦	970
③	320	⑧	340
④	315	⑨	580
⑤	250	単位：mm	

目的として開発したものである。浮遊渚を単体で設置し，収斂堤により入射波を装置中央に設けたパイプに流入させて送水する仕組みとなっている。原理として浮体に入射した波が傾斜板を遡上し，浮遊渚が上下運動を繰り返すポンプ作用で入射波エネルギーをパイプ流入時の落差で位置エネルギーに変換する作用により，タンク内に水を送水する。越波揚程の調整は，錘で行う。表-2 は実験で使用した浮遊渚の 1/17 模型の寸法である。前回の模型の斜面勾配は，1/2.43 であったが，今回の模型の斜面勾

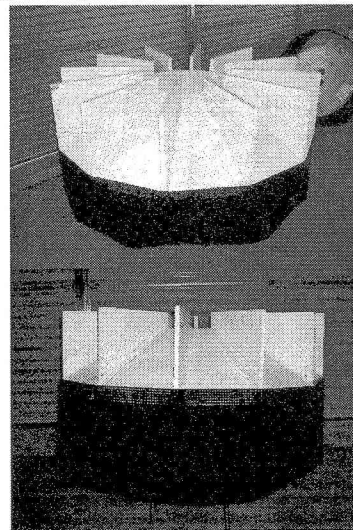


図-3 面浮遊渚模型（送水用）

表-2 浮遊渚模型寸法（送水実験用）

①	350	⑥	470
②	340	⑦	1490
③	310	⑧	520
④	480	⑨	900
⑤	325	単位：mm	

配は送水量を増加することを目的に前回よりも急な勾配である $1/1.48$ とした。

3 軸加速度計により消波模型の固有周期を求めた。運動方向を x 軸方向(surging), y 軸方向(swaying), z 軸方向(heaving) とすると、それぞれ 1.15s , 0.99s , 1.02s となり、この模型の固有周期は約 1.0s である。

図-4, 5 は、消波用模型を用いて有義波高 5cm , 周期がそれぞれ 1.0s , 2.0s で実験をしたときの x , y , z 方向の加速度である。これから波の周期が 1.0s で模型の固有周期と一致する場合は、 x , y 方向の加速度がほぼ同程度となり、波の周期が 2.0s のときは y 方向の加速度が大きくなった。 y 方向の値が発生するのは、yawing が生じていることと反射波の影響であると考えられる。周期に関係なく z 方向の揺れが小さいと言え、一般的な浮体構造物と異なり、浮遊渚は波が浮体上に載ることから鉛直方向の揺れが軽減される特徴がある。この特徴が、消波機能や送水機能の向上をもたらすものと考えられる。今回は、実験ごとに加速度も計測したが、詳細な検討は今後行う。

係留方法は、強拘束係留ではなく半拘束係留に属するカテナリー係留とした。加藤等⁵⁾は浮体の回転運動を部分的に拘束するために、浮体を水深(h)の $2.0 \sim 3.0$ 倍の長さで水底より係留するとした。そこで、係留は $\phi=2\text{mm}$, 長さ 140cm ($2h$, ここで h は水深)のステンレスチェーンを使用した四点係留とした。今回の実験は、浮遊渚の消波特性と送水特性を把握し、性能を向上させるためのデータを得ることを目的に行った。

以下に、消波特性実験と送水特性実験結果を述べる。

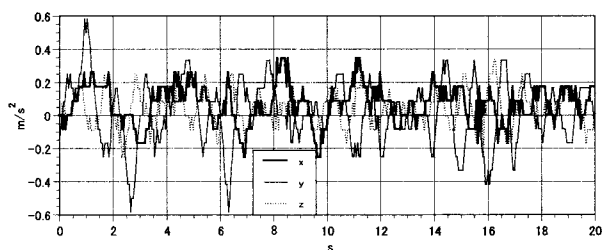


図-4 加速度の時系列（送水実験：周期 1.0s ）

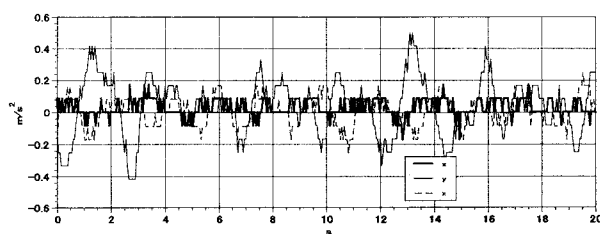


図-5 加速度の時系列（送水実験：周期 2.0s ）

3. 消波特性について

(1) 実験方法

実験は、東海大学海洋学部臨海実験場の縦・横それぞれ 22.0m , 23m , 深さ 1.2m の平面水槽を用いて行った。実験領域を、水深 (h) 約 70cm で一定となる部分の長さを縦 9.5m とし、導波板で横幅を 10m とした。この導波板は鏡像壁と考え、無次元配列された浮体まわりの波動場を近似的に再現した。また、水槽壁による反射波を防ぐ為に実験領域背後に消波工を設置した。

浮遊渚模型（縮尺 $1/25$ ）計 5 台を、直線に配置することで基礎的な消波特性についての検討を行うための直列配列と浮体を前後に配置出来るため開口部を遮断出来る利点を持つ千鳥配列の 2 ケースの配列で実験を行った。また、今回は浮体模型頭頂部に流入した水を浮体間に放流した場合（水流有り）と栓をして放流しない場合（水流無し）の 2 ケースについても実験を行った。

なお、造波板によって発生させる波は、浮体列に対し直角に入射する波とした。越波部揚程(余剰浮力)は浮遊渚内部に均等に設置した錘で 3.8cm に設定した。

図-6, 7 はそれぞれ 5 基の模型を直列配列と千鳥配列に設置した時の配置図と波高計設置位置である。直列配列では波高計を浮体列背後に 5 台、浮体列間に 1 台、浮体列前方に 2 台の計 8 台設置した。千鳥配列では現象を中心線に対称と考えて、波高計を浮体列背後中心左側に 3 台、浮体列間一列目に 2 台、二列目に 1 台、浮体列前方に 2 台の計 8 台設置した。

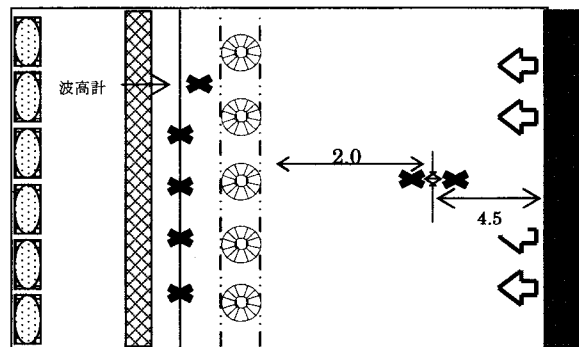


図-6 浮遊渚設置位置と計測位置（直列配列）

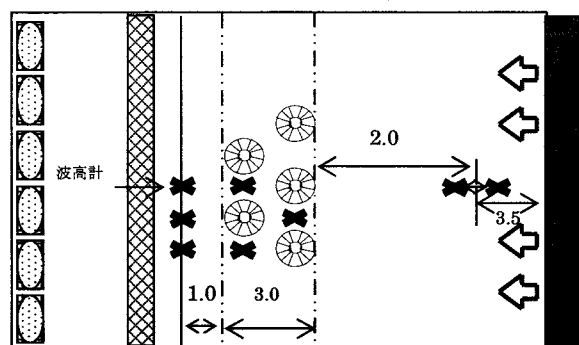


図-7 浮遊渚設置位置と計測位置（千鳥配列）

なお、浮体列前方に設置した波高計間隔は、 $\Delta L=40\text{cm}$ とした。浮体前方の2台の波高計で反射率を算定し、透過率は浮体前方の波高計と浮体背後1mにある波高計の値から算定した。

直列配列及び千鳥配列の浮遊渚模型開口幅は、前回の実験を参考にして0.25mと設定した。

実験はスネーク式の多方向不規則波造波機（綽テトラ製）を使用して、全て不規則波で実験を行った。入射波条件は、表-3に示すように、波高($H_{1/3}$)は5.0, 8.0, 10.0cm, 周期($T_{1/3}$)は1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00sである。なお、同表にその実験波を実海域に換算したものを併記した。

計測に際しては、サンプリング時間を0.05s, データ総数は2048個とした。

表-3 入射波条件（実海域値）

波高 $H_{1/3}$ (cm)	5.0, 8.0, 10.0	波高 H_p (m)	1.25, 2.00, 2.50
周期 $T_{1/3}$ (s)	1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00	周期 T_p (sec)	5.00, 6.25, 7.50, 8.75, 10.0
波長 L (m)	1.60, 2.35, 3.10, 3.85, 4.60	波長 L_p (m)	38.65, 57.91, 77.17, 95.69, 114.20

(1) 結果及び考察

図-8, 9はそれぞれ直列配列, 千鳥配列に浮体を設置したときの実験の様子である。入射した波が、浮体背後で減衰していることがわかる。また、浮体の形状特性により、波を受けてもほぼ水平であることがわかる。

H_t を透過波高、 H_i を入射波波高、 H_R を反射波高とすると、エネルギー保存則から透過率(K_T)、反射率(K_R)、減衰率(K_L)はそれぞれ次式で定義される。

$$K_T = H_t/H_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K_R = H_R/H_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$K_L = 1 - K_T^2 - K_R^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-10, 11はそれぞれ直列配列と千鳥配列の場合の水流がない場合とある場合における浮体幅(B)と入射波波長(L)との比(B/L)と減衰率(K_L)との関係である。今回は、前報⁴⁾で消波効果が大きかった浮体間隔が0.25mを採用してすべての実験を行っ

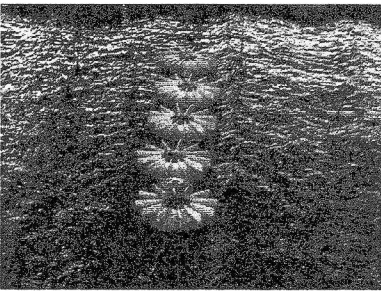


図-8 直列配列の消波実験

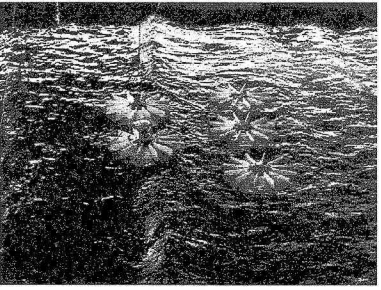


図-9 千鳥配列の消波実験

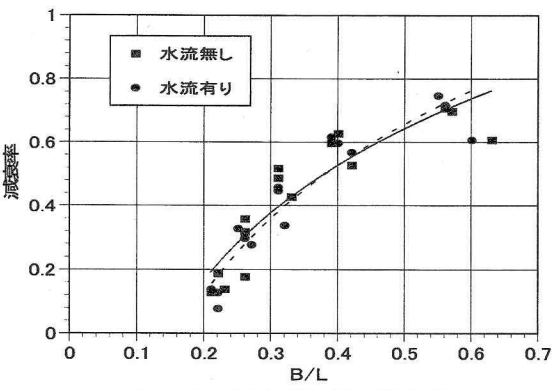


図-10 減衰率（直列配列）

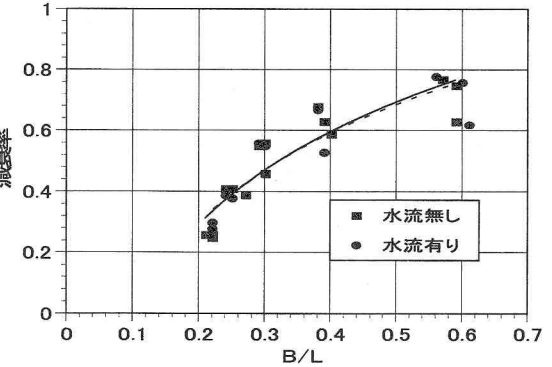


図-11 減衰率（千鳥配列）

た。

送水による水流無しと有りのケースについて比較検討する。図-10より減衰率は直列配列で水流無しの場合、 $B/L=0.21\sim0.63$ において $K_L=0.13\sim0.71$ となり、水流有りの場合では $B/L=0.21\sim0.60$ において $K_L=0.08\sim0.75$ となった。同じ波高のとき周期が短いと送水量が多くなることから、 B/L が増加すると若干ではあるが水流により減衰率が増すものと考えられる。次に、図-10の千鳥配列の実験結果より、水流無しの場合、 $B/L=0.21\sim0.59$ において $K_L=0.25\sim0.77$ となり、水流有りの場合では $B/L=0.22\sim0.61$ において $K_L=0.26\sim0.78$ となった。千鳥配列では、水流による消波効果は実験結果より水流作用による消波効果自体、全体的にそれ程顕著な差は見られなかった。

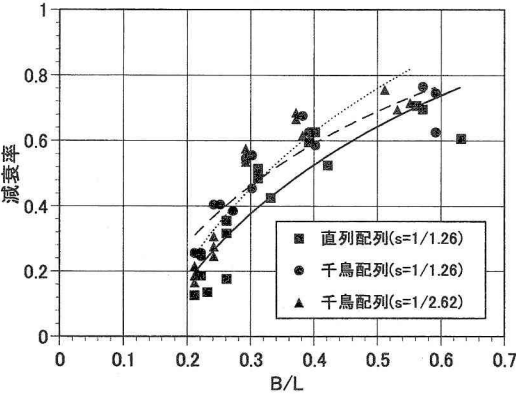


図-12 配列による減衰率

図-12 は、配列による減衰効果を示したものである。今回の実験範囲の B/L に対して、直列配列よりも千鳥配列の方が減衰率が大きくなった。また、図-12 に併記した、斜面勾配が今回 (1/1.26) よりも緩やか (1/2.62) な千鳥配列の減衰率はほぼ同程度の値となった。

波の運動エネルギーは浮遊渚の動揺による位相差反射が引き起こされることによって消波されることから、浮体の固有周期に近い約 1.0s の周期の波の方が減衰効果が大きくなるといえる。しかし、周期が長くなるにつれて、浮体が波に乗ってしまい位相差反射及び送水作用による消波効果が期待できなくなった。

4. 送水特性について

(1) 実験方法

本実験は、浮遊渚模型を単体で設置したときの送水特性を把握することを目的に、越波揚程を変化させて、入射波の波高、周期に対する送水量とエネルギー効率の関係を求めた。表-2 は図-2 の記号に沿って表記した模型の寸法であり、縮尺は 1/17 である。

図-13、図-14 に浮遊渚模型、送水量測定タンク及び波高計の設置位置を示した。浮体中心部とタンクをパイプで繋げ、タンクに設置した波高計の水深増加量から送水量を求めた。タンクヘッド高さ (h_1) は静水位 70cm に合わせ、浮体の越波揚程 (h) は 2cm

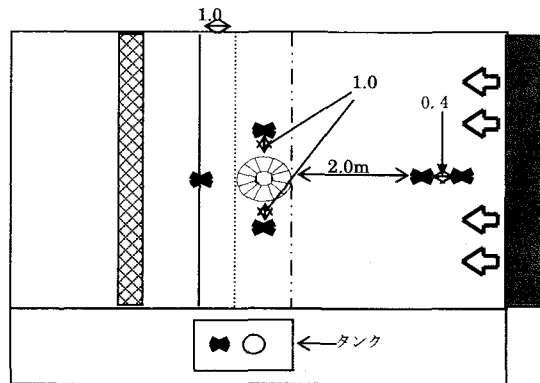


図-13 浮遊渚設置位置と計測位置

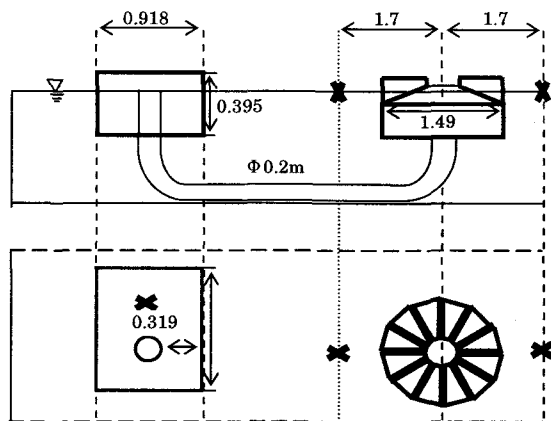


図-14 浮遊渚と送水量測定タンクの位置

から 10cm まで 2cm 刻みで変化させて計測した。

入射波条件は、表-3 に示す消波特性の実験と同条件とし、計測条件も消波特性の実験と同条件とした。

(2) 結果及び考察

不規則波のエネルギーは、(4) 式で求めた⁶⁾。

$$P_w = 0.44 H_{1/3}^2 T_{1/3} B \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、ヘッド差 h の管内の送水エネルギーは (5) 式となる⁷⁾。

$$P = \rho g Q h \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高 (m)、 $T_{1/3}$ は有義波周期 (sec)、 B は浮体長 (m)、 Q は送水量 (m^3/sec)、 h は揚程高さ (m) である。(5) 式において、密度 ρ を 1.0×10^3 (kg/m^3) とすると、(4)、(5) 式から求まるエネルギー単位は kw となる。

また、(4)、(5) 式よりエネルギー効率 (η) は (6) 式で定義される。

$$\eta = P / P_w \quad \dots\dots\dots (6)$$

図-15 は越波揚程が $h=6cm$ の場合において周期をパラメーターにした時の波高と送水流との関係である。全体的に波高が増加すると送水量も増加し、周期に関しては、1.0s から 1.25s までは送水量が増加するがその後 2.0s になるにつれ送水量が減少している。周期が短くなる程、同じ時間内に多くの波が入射することから送水量が増加するが、周期が大きくなると消波効果と同様に浮体が波に乗ってしまうために上手く越波されないことから送水量が減少する。図-16 は越波揚程が $h=10cm$ の場合であり、波高が増加すると送水量も増加しているが、 $h=6cm$ に比べ送水量はかなり減少している。今回の実験では $h=6cm$

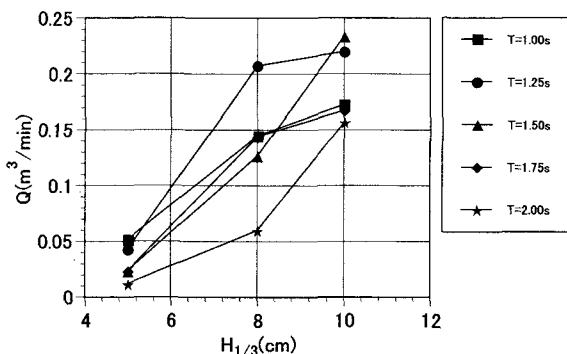


図-15 波高と送水量との関係 ($h=6cm$)

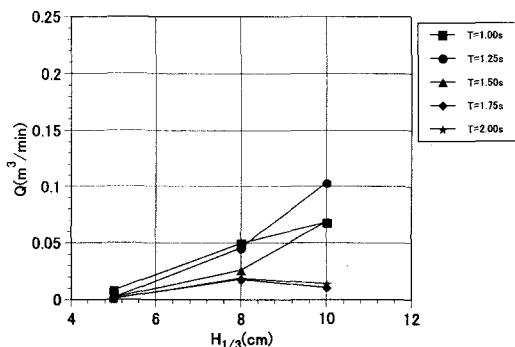


図-16 波高と送水量との関係 ($h=10cm$)

のときの送水量が最大となった。また、前報⁴⁾と今回の浮体の斜面勾配は、それぞれ 1/2.43, 1/1.48 であり、同じ $h=6\text{cm}$ の条件の送水量は、勾配が急な今回の浮体の方が約 2 倍以上の送水量を得ることが出来た。これは、勾配が急なため斜面を上る距離が短くなり、摩擦や砕波によるエネルギー損失が減少することに起因している。

図-17 は越波揚程が $h=6\text{cm}$ のときの周期をパラメーターにした時の波高とエネルギー効率(η)との関係である。送水量と同様な傾向があり、周期 1.25s, 波高 8cm のときの効率が最大で 35% となった。周期が短い程、入射波が多くなることから、送水量が増加する。全体的に波高が大きく、周期が短いほど効率が良い傾向にある。今回、傾斜板の勾配を急にしたことにより波の同条件で前報⁴⁾より約 2 倍の効率を得ることが出来た。

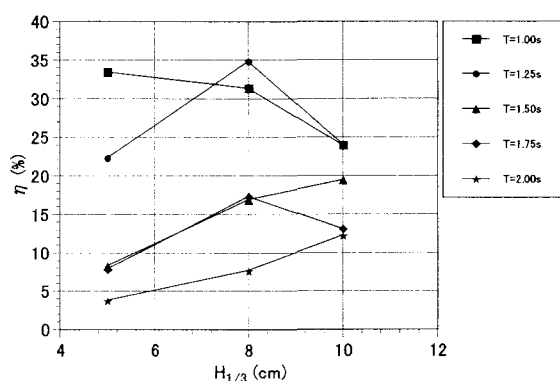


図-17 波高とエネルギー効率との関係 ($h=6\text{cm}$)

図-18 は越波揚程 4cm のときの $H_{1/3}^3 T_{1/3}^{-1}$ と送水量 Q との関係である。 $H_{1/3}^3 T_{1/3}^{-1}$ の値が増加すると Q の値はべき乗で増加する傾向がある。前述したように、揚程が同じ場合、送水量 Q は、波高が増加するにつれ、また、周期が短くなるほど増すことが分かる。今後、波高、周期、揚程の値と送水量 Q の関係を検討することとする。

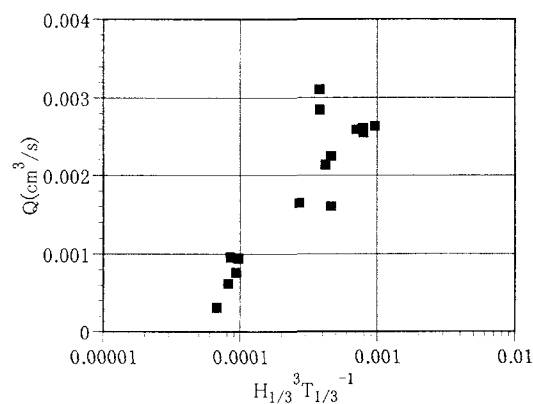


図-18 $H_{1/3}^3 T_{1/3}^{-1}$ と Q の関係 ($h=4\text{cm}$)

4. 結論

以上のことから結論として次のことが言える。

- 一般的な浮体構造物と異なり、浮遊渚は波が浮体上に載ることから鉛直方向の揺れが軽減され、周期に関係なく z 方向の揺れが小さい。
- 直列配列よりも千鳥配列の方が減衰率が大きく、水流による消波効果は、全体的にそれ程顕著な差は見られなかった。
- 全体的に波高が増加すると送水量も増加し、周期に関しては、1.0s から 1.25s までは送水量が増加するがその後 2.0s になるにつれ送水量が減少している。
- 今回の実験では $h=6\text{cm}$ のときの送水量が最大となった。
- 勾配が急な今回の浮体の方が約 2 倍以上の送水量を得ることが出来た。
- 周期 1.25s, 波高 8cm のときのエネルギー効率が最大で 35% となった。

以上の結果より、本研究で開発、改良することにより消波性能と送水効率を向上することが出来た。

今後、波動と浮体の動揺との関係について理論的、実験的に検討し、更なる改良を行っていきたい。

謝辞

研究を遂行するに当たり実験に協力していただいた東海大学海洋学部上級技術員 煙山政夫氏と実験等に協力していただいた大学院生、学部学生に感謝いたします。

参考文献

- 1) 第 1 回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, pp. 1-465, 1984.
- 2) 第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, pp. 1-457, 1987.
- 3) 田端竹千代, 柳生忠彦, 福田功: 日本沿岸における波のエネルギー, 港湾技研資料, No. 364, pp. 1-20, 1980.
- 4) 田中博通, 長津安洋, 真鍋安弘: 浮遊渚の消波特性と送水特性について, 海洋開発論文集, Vol. 20, pp. 455-460, 2004.
- 5) 加藤重一, 北上征男: Double Spaced Barrier Type 浮防波堤の消波効果について増養殖漁場外郭施設としての消波工の消波効果に関する研究(II), 農業土木試験場報告第 8 号, pp. 259-266, 1970.
- 6) 合田良実: 沿岸波浪の統計的性質, 第 1 回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, pp. 19-31, 1984.
- 7) 本間仁: 水理学 技術者のための流体の力学, 丸善, p. 117-118, 1978.