

浮遊渚の消波特性と送水特性について

ON THE WAVE ABSORBING CHARACTERISTIC AND THE WATER SUPPLYING CHARACTERISTIC OF THE FLOATING BEACH

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 静岡県静岡市清水折戸3丁目20番1号)

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

³ 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)

In this research, the "floating beach" which combines the floating breakwater and a pump function was developed. The floating beach is constituted from the board prolonged in the shape of radiation on the slope of a cone form at equal intervals, the skirt attached at the equipment lower part, and the hose for water supply extended in the lower part. In phenomenon the movement energy of a wave is dissipated by loss of that an incidence wave converges to equipment, and wave breaking and wave overtopping, and the dissipation by the skirt. Moreover, it is equipment which can send water to a lower layer through the hose with which the wave which ascended the inclination board flowed into the hole of the equipment central part, and was extended below by making the grade out of which the top part of the equipment central part comes for a while from the water surface float. This research examined the wave absorbing characteristic at the time of installing a floating beach model in straight line arrangement and alternate arrangement, and the water supply characteristic depended on floating beach.

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

1. はじめに

2004年1月8日付け「Nature」でイギリス Leeds 大学の国際研究グループが1103種の陸上動植物を調べた結果、現状のまま化石燃料を消費した場合、大気中のCO₂濃度が500~550ppmになり、15~37%の陸上動植物が絶滅する調査結果が発表された¹⁾。

駆動源を地球環境に負荷のかからない自然エネルギーである太陽光、風力、波浪、バイオマス等を積極的に活用する技術を開発することは、土木技術の使命であるものとする。

そこで、本研究において、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」を開発した。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。即ち、斜面に遡上した波を消波するとともに、波の運動エネルギーから位置エネルギーへの変換作用を利用して送水できる装置である。現象的には、装置への入射波を収斂、碎波、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される。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。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、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が期待される。その様な浮体構造物が実用化されることで、海洋空間利用に対する開発進行及び環境問題の改善に役立てられるはずである。

防波堤を大別すると重力式防波堤と浮消波堤があり、重力式防波堤が一般的である。浮消波堤は Joly²⁾ によって 'Floating breakwater' という名称で最初に研究された。我が国でも後に様々な形式の浮消波堤が研究開発され、本間等³⁾ は複合バリアー型、加藤等は台形型、逆台形型、長方形型⁴⁾、単純バリアー型⁵⁾、シート型⁶⁾、複合バリアー方⁷⁾、重連ポンツーン型⁸⁾、ポンツーン-バリアー型⁹⁾ について運動特性と物体長・波長比に対する消波特性について研究した。浮消波堤は、当初、軍事施設 (Mobile Breakwaters) や海上交通施設 (Transportable Breakwaters) のために研究されていたが、最近は大産養殖場外郭施設として研究されている。

また、浮消波堤は重力式防波堤等と比較すると、浮消波堤はその規模、形状、配列等の融通性に優れ、

水深や海底地形の影響をあまり受けずに設置が可能である。また、劣化・損傷した際の修理・交換が可能容易であるため維持・管理し易い。更に、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。

しかし、浮消波堤は、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。また、浮消波堤は形状や使用材質が様々であるため、消波効果が定かでない。従って、実際に施工する場合は、設計波高、海底地形や使用目的を考慮して重力式防波堤と比較すべきである。そもそも浮消波堤と重力式防波堤とを同一観点で論じるのは難しい。

本研究は、浮消波堤に属する浮遊渚について斜面板材質、係留方法、スカート長さ等を試行錯誤しながら開発し、それを直線配列及び千鳥配列に設置した場合の消波特性と浮遊渚 1 台よる送水特性を検討したものである。

2. 消波特性について

(1) 実験方法

本実験は、浮遊渚を直列配列と千鳥配列で配置した時の入射波に対する透過率、反射率及び減衰率を求めて消波機能を検討するために行った。

図-1 に示す本実験で用いた浮遊渚は模型縮尺 1/25 である。外観は円錐形状であり、外殻を傾斜板と装置の中央部より半径方向へ同間隔を保って放射上に延びた 12 枚の収斂堤を設け、外径に沿って巻かれたスカートで構成されている。また、中央部内側に、浮体の頂点部が水面より少し出る程度に浮遊させるために発泡スチロールを備え付けている。この構造ゆえに、波による動揺が生じた場合でも傾斜板や収斂堤に均等に力を分散することが可能である。従って、入射波の方向性を問わない特徴を持っている。図-2 は浮遊渚模型の正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。

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⁷⁾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 2.0~3.0 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 140 cm (2h) のステンレスチェーンを使用した四点係留とした。

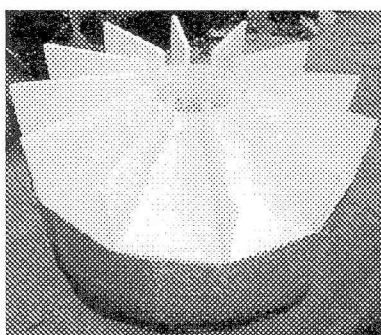


図-1 浮遊渚模型

越波部揚堤(余剰浮力)は浮遊渚内部に均等に設置した錘で 1.5cm に設定した。

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

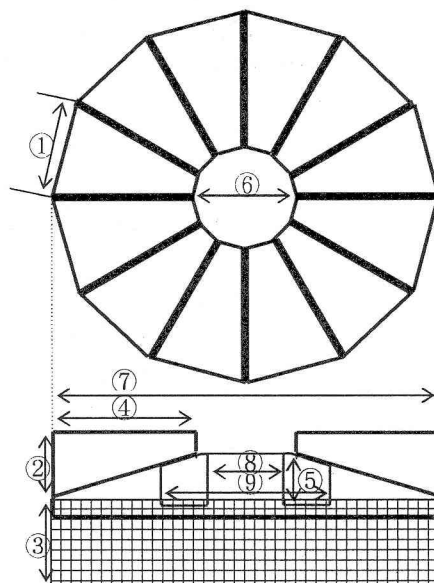


図-2 浮遊渚模型 (上面・正面)

表-1 浮遊渚模型寸法 (消波実験用)

①	255	⑥	290
②	210	⑦	960
③	260	⑧	250
④	288	⑨	500
⑤	110	単位: mm	

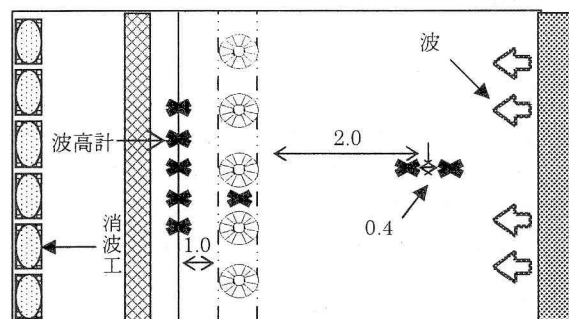


図-3 浮遊渚設置位置と計測位置 (直列配列)

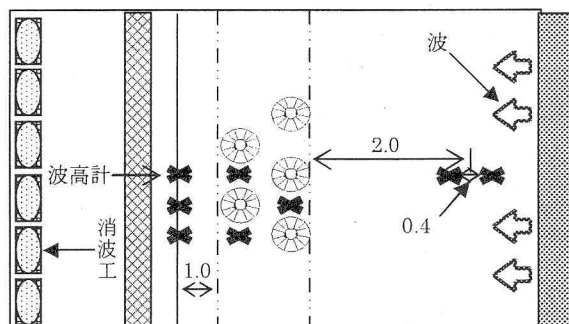


図-4 浮遊渚設置位置と計測位置 (千鳥配列)

て行った。実験領域を水深 (h) 70 cm で一定となる部分の長さを縦 9.5 m とし、導波板で横幅を 10 m とした。この導波板は鏡像壁と考え、無限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。図-3、4 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模型堤列背後に 5 台、模型堤列間に 1 台、模型堤列前方に 2 台の計 8 台設置した。千鳥配列では現象を中心線で対称と考えて、波高計を模型堤列背後中心左側に 3 台、模型堤列間一列目に 2 台、二列目に 1 台、模型堤列前方に 2 台の計 8 台設置した。なお、模型堤列前方に設置した波高計間隔 (図中の $\Delta\ell$) は、規則波で $\Delta\ell \simeq L/4$ 、不規則波 $\Delta\ell \simeq 40\text{cm}$ とした。模型前方の 2 台の波高計で反射率を算定し、透過率は模型前方の波高計と模型背後 1m 位置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、0.5m、0.375m、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 (株式会社トウ製) 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-2 に示すように、波高 5.0、8.0、10.0cm、周期 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-2 入射波条件及び実海域値

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

(2) 結果及び考察

図-3、4 に示す様に模型堤列約 1m 背後の波高計で透過率 K_T を、模型堤列約 2m 前方の波高計で反射率 K_R を測定した。 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、減衰率 (K_L)、透過率 (K_T)、反射率 (K_R) はそれぞれ次式で定義される。

$$K_T = H_I / H_T \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

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

図-5 は直列配列で模型間隔をパラメーターとした、浮遊渚幅 (B) と入射波波長 (L) との比 (B/L) と透過率 (K_T) との関係である。ここで使用している記号は、模型間隔が 0.25m (26%) は $\blacklozenge$ 、0.375m (39%) は $\blacktriangle$ 、0.5m (52%) は $\blacksquare$ である。括弧内の数字は模型間隔を模型の直径で除した開口率である。この図より、B/L=0.22~0.61 の時、透過率は 1.0 から 0.54

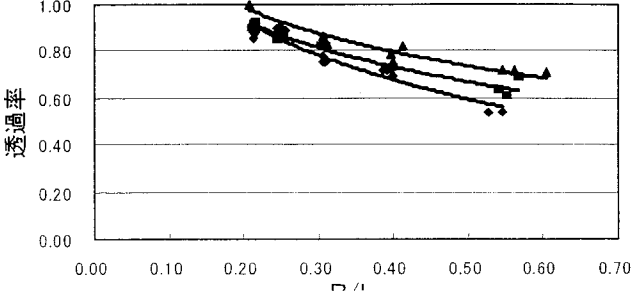


図-5 透過率 (直列配列)

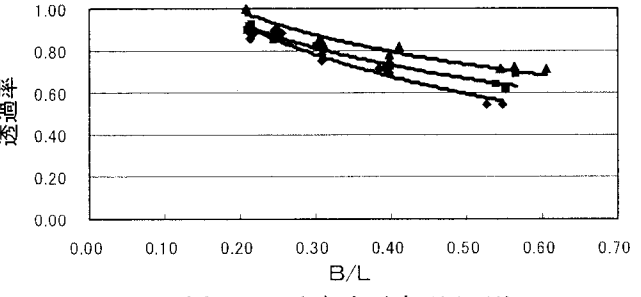


図-6 減衰率 (直列配列)

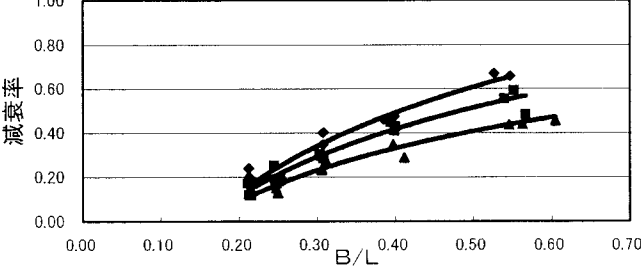


図-7 透過率 (千鳥配列)

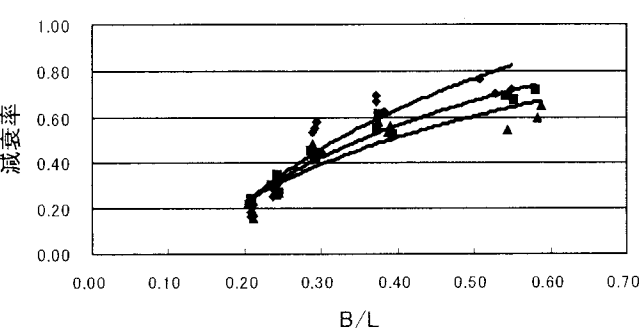


図-8 減衰率 (千鳥配列)

まで減少し、模型間隔が大きくなるほど透過率も全体的に大きくなっている。図-6 は直列配列で模型間隔をパラメーターとした、B/L と減衰率 (K_L) との関係である。B/L が増加するにつれ、 K_L は大きくなり、約 0.11~0.68 の範囲となった。これを最大透過率及び減衰率を見ると、B/L=0.55 の時に、 $K_T=0.54$ 、 $K_L=0.68$ となる。なお、反射率 (K_R) は、B/L、模型間隔に関係なく、ほぼ 0.2 付近の値となった。

図-7 は千鳥配列で模型間隔をパラメーターとした、B/L と K_T との関係である。B/L=0.22~0.58 の時、 K_T は 0.90 から 0.41 まで減少し、模型間隔が大きくなるほど透過率も全体的に大きくなっている。

図-8は前述した模型間隔をパラメーターとして表わした千鳥配列の場合の B/L と K_L との関係である。 B/L が増加するにつれ、 K_L は約 0.15 から 0.76 まで増加し、模型間隔が狭くなるほど減衰率は大きくなった。次に、直列配列と比較すると、 K_T は 7%程小さくなり、 K_L は 8%程大きな値となり、浮遊渚を千鳥状に配列することにより消波効果を向上することが出来る。

3. 送水特性について

(1)実験方法

本実験は、浮遊渚の送水特性を把握することを目的に、浮遊渚模型を単体で設置した時の波特性と送水量との関係を求めた。表-3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 1/25 である。

表-3 模型寸法（送水実験用）

単位 (mm)			
①	360	⑤	1430
②	285	⑥	485
③	410	⑦	310
④	525		

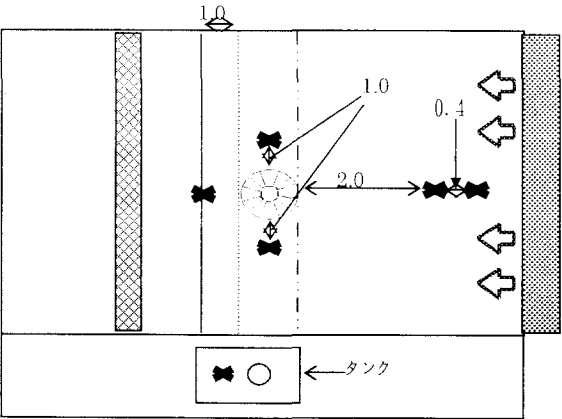


図-9 浮遊渚設置位置と計測位置

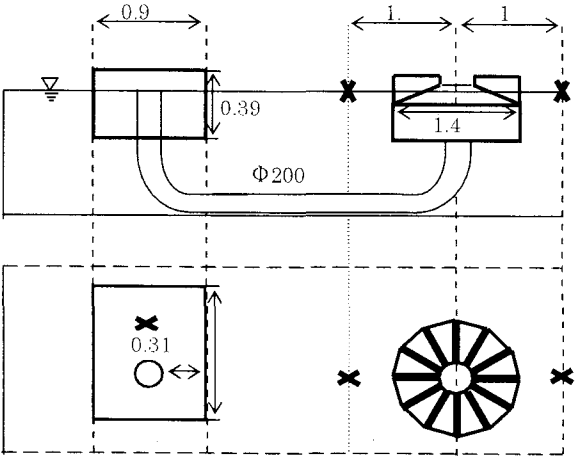


図-10 浮遊渚と送水量測定タンクの位置

図-9、図-10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。浮遊渚模型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から送水量を測定した。

原理としては、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ことでポンプの役割を果たす。今回は、余剰浮力をもたらす越波揚程 (h) を 2cm から 10cm まで 2cm 刻みで変化させることと、静水位 70cm に対してタンクヘッド高さ (h_1) を 0cm, -2cm, -4cm, -6cm に設定して計測した。

入射波条件は、表-2に示す消波特性の実験と同条件とし、計測条件もサンプリング時間 0.05s, データ総数は 2048 個とし、消波特性の実験と同条件とした。

(2)結果及び考察

合田¹⁰⁾によれば、不規則波のエネルギーは、(4)式で求めることができる。

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

また、ヘッド差 h の管内の送水エネルギーは(5)式となる。

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

ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高(m)、 $T_{1/3}$ は有義波周期(s)、 B は浮体長(m)、 Q は送水量(m^3/s)、 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。

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

今回の実験は、越波揚程(h)とタンクヘッド高さを変化させたので、タンクヘッドの静水面からの減少分(h_1)を考慮して(5)式から送水エネルギーを計算した。

図-11は越波揚程が $h=6cm$ でタンクヘッド高さが静水面と同じ場合における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。波高が高くなるにつれて送水量が増加し、周期が短くなる程、波が多く入射することから送水量が増加した。現象的ではあるが、浮遊渚模型の固有周期と入射波の周期が一致すると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も考えられる。これについては今後検討する必要がある。

全般的には、越波揚程が低くなる程送水量が増加している。例外として、周期 2.0s に多く見られるように、送水量が減少する場合がある。それは、入射波が模型自体を越波することと、または模型中央部に収斂された入射波が送水の限界を超えたために溢れてしまうような現象が見られた。

図-12は周期 1.5s でタンクヘッド高さが静水面と同じ場合における越波揚程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、越波揚程が小さくなる程、送水量が増加する傾向がある。タンクヘッド高さを

静水面と同じにした実験ケースにおいて、越波揚程 4cm、波高 10cm、周期 1.0s の時に送水量が 0.186 m³/min となった。これを一日当たりの送水量に換算すると直径 1.46m の浮遊渚でも約 270m³にもなる。実海域では浮遊渚のスケールも大きくなることから、膨大な表層水を下層に送水することができる。

図-13 は越波揚程が h=6cm でタンクヘッド高さが静水面と同じ場合における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。前述したように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。この図においては、波高 8cm で η がピークとなる分布となったが、越波揚程が 8cm、10cm の場合は、波高が増加するほど η も増加する分布となり、越波揚程が 4cm、2cm と小さくなると逆に波高が増加するにつれ η は減少する分布となった。これは、越波揚程が大きくなると波高の小さい波は選上できなくなることと、越波揚程が小さくなると波高の大きな波は浮遊渚頂部を越波するこ

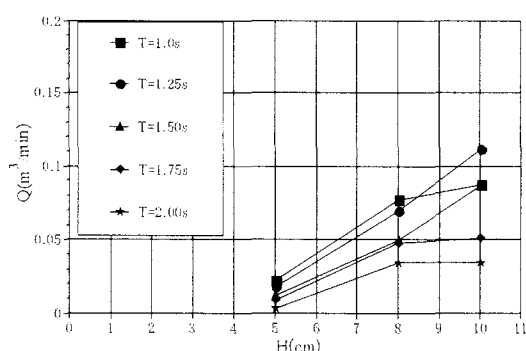


図-11 波高と送水量との関係 (h=6cm)

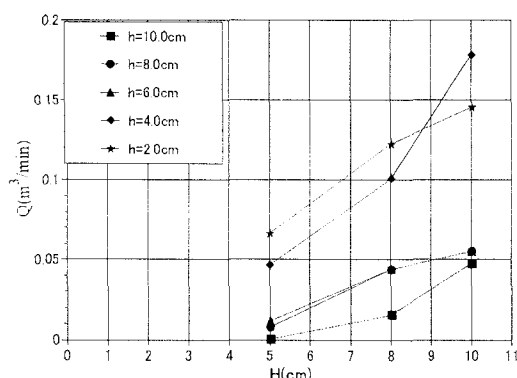


図-12 波高と送水量との関係 ($T_{1/3}=1.5s$)

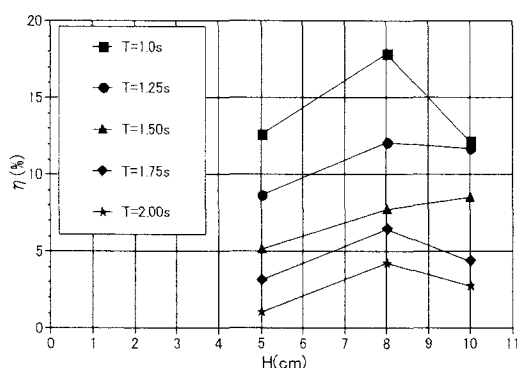


図-13 波高とエネルギー効率との関係 (h=6cm)

とによる損失によるものと考えられる。越波揚程 4cm、波高 5cm、周期 1.0s の η は 24.0% となった。

図-14 は越波揚程が h=6cm、周期 1.5s におけるタンクヘッド高さをパラメーターにした時の波高と送水量との関係である。波高が増加するにつれ、送水量も増加する傾向がある。しかし、タンクヘッド高さによる送水量の傾向は明確でなく、タンクヘッド高さが増加するにつれ、送水量は増加から減少へと変化している。浮遊渚のような機構においては、ヘッドの増加が必ずしも送水量の増加をもたらすとは言えないことを現しており、浮体の動揺や管内の流動状況等を詳細に検討することが必要である。

図-15 は図-14 と同条件での波高とエネルギー効率との関係である。波高は増加すると η も増加する傾向は見られるが、タンクヘッド高さについては送水量と同様な傾向がある。この図より、波高 10cm で約 25% の効率が期待できる。

以上の結果より、本研究で開発した浮遊渚は養殖場の周囲に設置し、その海域の平穏を保ちつつ、送水することにより有酸素水を供給できるものと考えられる。また、外海から閉鎖性海域への送水による浄化も考えられる。

4. 結論

以上のことから結論として次のことが言える。

- ・ 直列配列において、B/L が増加するにつれ、 K_T は

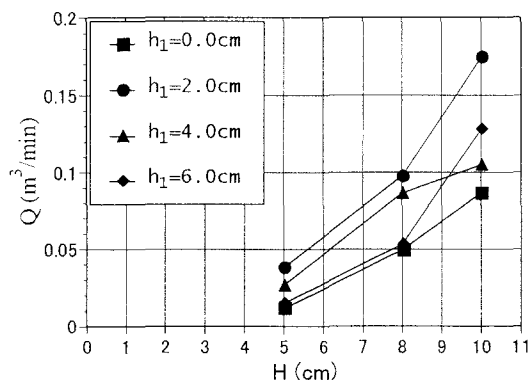


図-14 波高と送水量との関係
(タンクヘッド高さ毎)

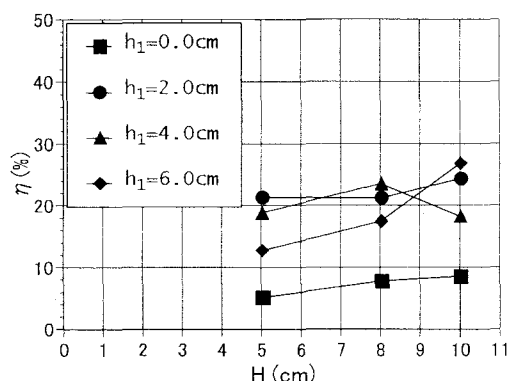


図-15 波高とエネルギー効率との関係
(タンクヘッド高さ毎)

減少し、 K_L は増加する。千鳥配列の場合も同様な傾向があるが、直列配列と比べ K_T は7%程小さくなり、 K_L は8%程大きな値となった。

- K_R は、 B/L 、模型間隔に関係なく、ほぼ0.2付近の値となった。
- 波高が高くなるにつれて送水量が増加し、周期が短くなる程、波が多く入射することから送水量が増加する。
- 越波揚程が小さくなる程、送水量が増加する傾向がある。
- 越波揚堤4cm、波高5cm、周期1.0sの時、24.0%のエネルギー効率が得られた。
- タンクヘッド高さが増加するにつれ、送水量は増加から減少へと変化している。

今回の報告は、改良を重ねて浮遊渚を開発し、その消波特性と送水特性を求めることを主眼に行った実験結果である。当然ながら、消波特性と送水特性は、浮遊渚の固有振動周期と関係があるものと考えられ、今後、浮遊渚の動的特性を把握することが必要である。また、浮遊渚は、そのスケールにより波高・周期・波長等の波浪条件に左右されることから、今後、バラストシステムの装備により越波揚程調節を可能にすることと、傾斜勾配、収斂堤の角度、浮体の動揺特性の改良を行うことで実用化が十分可能であるものと考えられる。

殊に、未活用である膨大な波エネルギーを創意工夫して利活用することは、魅力的な仕事でもある。

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 煙山政夫氏と実験遂行時に大学院生であった 松井孝文氏(現 ㈱ライテック)並びに学部生であった 三和展大氏(現 セントラルコンサルタント㈱)、中島雅之氏(現 社会福祉法人芳洋会)に感謝いたします。

参考文献

- 1) Chris, D. Thomas, et al.: Extinction Risk From Climate Change, Nature 427, pp.145-148, 2004.
- 2) Joly, J.: On floating Breakwater, Royal Dublin Society, Scientific Proceedings, Vol.10, Part3, pp.378-383, 1905.
- 3) Honma, M., Horikawa, K. and Mochizuki, H.: An Experimental Study on Floating Breakwaters, Proc. of the 10 Japanese Conference on Coastal Engineering, pp.144-147, 1963.
- 4) 加藤重一, 乃万俊文, 北上征男, 荻野静也: 浮防波堤の消波効果について, 農業土木学会論文集 23号, pp.33-38, 1968.
- 5) 加藤重一, 乃万俊文, 北上征男, 荻野静也: 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, 農業土木試験場報告第7号, pp.173-200, 1969.
- 6) 加藤重一, 乃万俊文, 荻野静也: シート型浮防波堤の消波効果について, 第16回海岸工学講演会講演集, pp.297-299, 1969.
- 7) 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.
- 8) Kato, J. and Tsuchiya, S.: Basic Study Concerning the Development of Floating Breakwater III, Wave Damping Characteristics of Double Module, Journal of the Tokyo University of Fisheries, Vol.67, No.2, pp.75-80, 1981.
- 9) Kato, J. and Tsuchiya, S.: Basic study Concerning the Development of Floating Breakwater on Wave Damping Characteristics of Pontoon-barrier Type, Journal of the Tokyo University of Fisheries, Vol.68, pp.1-14, 1982.
- 10) 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.