

沈水植物の波浪低減効果に関する研究

THE WAVE DAMPING EFFECT BY SUBMERGED PLANTS IN LAKE.

大石 哲也¹, 三輪 準二², 熊田貴之³, 野志保仁³
Tetsuya OOISHI, Junji MIWA, Takayuki KUMADA and Yasuhito NOSHI

¹ 正会員 工博 (独) 土木研究所 河川生態チーム 研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

² 正会員 (独) 土木研究所 河川生態チーム 上席研究員 (同上)

³ 正会員 工博 (株) 水圏科学コンサルタント技術部 (〒145-0064 東京都大田区上池台 1-14-1)

The purpose of this study is to show the damping effect of the wave force by submerged plants in lakes. Two dimensional wave flume and artificial plants instead of real submerged plants were used for that purpose. In the experiment, the lakefront of 1/2 scales was produced for Lake Kasumigaura in the flume. The set range and the density of artificial plants changed, and the damping of the offing waves ($H_0=10-30\text{cm}$) force was verified.

As a result, the damping effect was due to the set range and the density of artificial plants. On the maximum set range and density of the plants, the damping ratio was 42% compared with the case without the plants. Moreover, the movement of the sand bar stopped at the planting position though the wave height rose. In conclusion, submerged plants didn't only have the damping effect, but also had the littoral drift control greatly in lakes.

Key Words : *submerged plants, Kasumigaura Lake, damping, two dimensional wave flume,*

1. はじめに

沈水植物は、川・湖・海の水中で生育する植物である。霞ヶ浦では、この沈水植物が 1990 年以降にほとんど消滅しており¹⁾、その回復が急務となっている^{2,3)}。湖沼における沈水植物は、これまで仔稚魚の産卵場⁴⁾、透明度の向上^{2,3,5,6)}などに寄与し、現地観測、実験、解析等を通じ、水域における生物生態系の一次生産者として主に生態学的側面からその効果が説明されてきた。

一方、本研究で検討するような湖沼における沈水植物が有する波浪低減効果がどの程度であるかといった水文学的側面については、ほとんど知られていない。

沈水植物が有する波浪低減効果は、主に海洋での浸食海岸保全の検討に際し、アマモやアマモを模擬した人工海藻を用いた波浪・漂砂制御あるいは洗掘に関する実験や解析が行われてきている⁷⁻¹⁰⁾。これらの実験は、海藻の持つ波浪低減効果の現象解明の一助となったが、底質の相似則の問題から、実スケールに対して扱う粒径が大きくなりすぎる、あるいは固定床での実験であるため、地形変化形状の与える影響を十分に考慮できていないことが考えられる。さらに湖沼の沈水植物は、海浜に生育するアマモとは異なり、比較的深い箇所(2m 以深)でも水面近くまで成長している場合が少なくない。したがって、湖沼における沈水植物の波浪低減効果は、海洋

でのアマモ等の沈水植物よりも大きい可能性がある。

そこで本研究では、沈水植物の波浪低減効果を明らかにすることを目的として、二次元大型実験水路を用い、波動場における模型植物による地形形状の変形および地形変形に伴う波高や遡上高さの減衰効果に着目して検討を行った。

2. 実験概要

本実験では、霞ヶ浦湖岸を対象に実スケールに近い 1/2 縮尺の地形模型を二次元造波水槽内に作成し、沈水植物の有無、密度の違いから、その比較を通じ、減衰効果を検証することとした。

(1) 波浪諸元

a) 波高と周期

実験条件を決めるため、比較的静穏な土浦入り奥部の蓮河原地区と、比較的波当たりが強い天王崎地区を対象に、1978-2004 年の湖心で観測された風データより、波浪推算を実施した。本実験の縮尺率を考慮すると、波高 $H_0=0.1\text{m}-0.6\text{m}$ 、周期 $T_0=0.7-3.2\text{s}$ の範囲となる。

本実験では、波形勾配 (H_0/L_0) を検討しつつ、水槽にて造波可能な波を選定し、波浪諸元として、波高は $H_0=0.1-0.3\text{m}$ 、周期 $T=1.5(\text{s})$ に固定した(表-1)。

地点 : A 砕波点より沖側の波高計測位置
 地点 : B 砕波点より岸側の波高計測位置

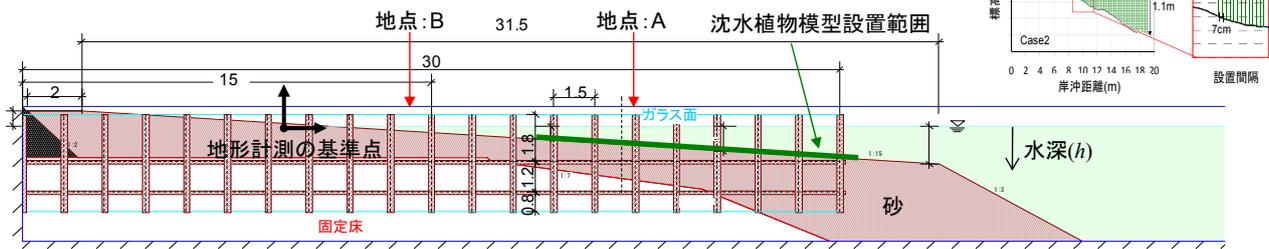


図-1 波高計測位置および流速計設置位置と沈水植物の敷き詰め範囲

表-1 実験ケースと条件

Case	実験波浪			沈水植物模型	
	波高 H_0 (m)	周期 T_0 (s)	造波時 間(h)	設置範囲 水深(m)	設置間隔 (m)
Case1	a)0.1	1.5	1	-	-
Case2	b)0.15			0.3-1.1	0.07
Case3	c)0.2			0.3-0.7	0.07
Case4	d)0.25			0.3-1.1	0.14
	e)0.3				

b) 粒径

霞ヶ浦蓮河原地区や天王崎地区では、水深 1m 以深で底質粒径の平均が約 0.25mm に収束する。本実験では、この底質粒径から縮尺率を考慮し、東北珪砂 7 号 $d_{50}=0.15\text{mm}$ (0.1-0.2mm が 90%以上) の砂を使用した。

c) 各ケースにおける初期地形の形成

実験開始前の地形勾配は、1/15 (過去の移動床実験において、0.1-0.2mm の粒径が安定する地形勾配¹²⁾) とした。波浪は、湖浜が安定形に至るまで作用させ、これを初期地形とした。この初期地形を水路壁面にトレースした後に Case1 の実験を開始した。以降のケース (Case2-4) では、このトレースした初期地形に沿って地形を整地し直したうえで、各ケースの波高実験を行った。なお、波作用後の地形の平衡勾配は 1/12 であり、約 1 時間で平衡状態に至った。このことから、各ケースの造波時間は 1 時間としている。

d) 造波水路

造波水路は、幅 2.0 m、長さ 140 m、深さ 5.0 m からなる国土技術政策総合研究所の漂砂実験水路を用いた。

(2) 計測項目と実験ケース

計測項目は、砕波帯の沖側 (地形計測の基準点から 11.75m, 地点 A), 岸側 (同 3.5m, 地点 B), 各ケースでの砕波点の波高, 砕波後の遡上高とした (図-1)。

実験ケースは表-1 に示した 4 ケースとした。波高は、0.1m から 0.3m まで 0.5m 刻みに変化させ、造波時間は各波高で 1 時間とした。Case1 は沈水植物模型無しのケース, Case2 は沈水植物模型を水深 $h=0.3-1.1\text{m}$ まで設置したケース, Case3 は沈水植物模型を水深 $h=0.3-0.7\text{m}$ まで設置したケース, Case4 は Case2 と同様に沈水植物模型を水深 $h=0.3-1.1\text{m}$ まで設置し設置密度を Case2 の半分としたケースである。Case2 と Case3 の沈水植物模型の設置間隔は 0.07m ピッチ (図-1 設置例を参照のこと), Case4 は 0.14m とした。なお、本実験は波高が徐々に上昇するとともに地形が変化する現象を知ることとし、連続的に波高値を上昇させている。

(3) 沈水植物模型

沈水植物模型の素材は、ポリエチレン製で厚さ 0.01mm,



写真-1 沈水植物模型

幅 5mm の紐を用いた (写真-1)。これを水路幅 2m に 1cm 間隔で設置した。この際、あらかじめ紐の間隔が 1cm となるように紐の下部を別の紐を通し接着し、地表面から深さ 5cm の位置に接着部を埋めた。また草丈は、どの場所でも水面付近までとした。この理由は、本実験での設置範囲 (最大で 1.1m 深) であれば、実湖沼でもほぼ水面まで沈水植物の生長が可能と考えたからである。

(4) エネルギー低減率の算定

沈水植物模型による波浪低減効果を知るため、エネルギー低減率の算定を行った。ここでいうエネルギー低減率とは、沈水植物模型無しのケース (Case1) と沈水植物模型設置のケース (Case2-4) の波エネルギーの比率を 1 から差し引いたものとして定義する。波エネルギーとは、地形変化を起こす波エネルギーフラックス (波高 H の 5/2 乗)¹¹⁾ を示す。以下に式を示す。

$$K_E = 1 - (H_n^{5/2} / H_1^{5/2}) = 1 - (E_n / E_1) \quad (1a)$$

ここに K_E : エネルギー低減率, H_n : ケース毎の波高, H_1 : Case1 の波高, E_n : ケース毎の波エネルギーフラックス, E_1 : Case1 の波エネルギーフラックス

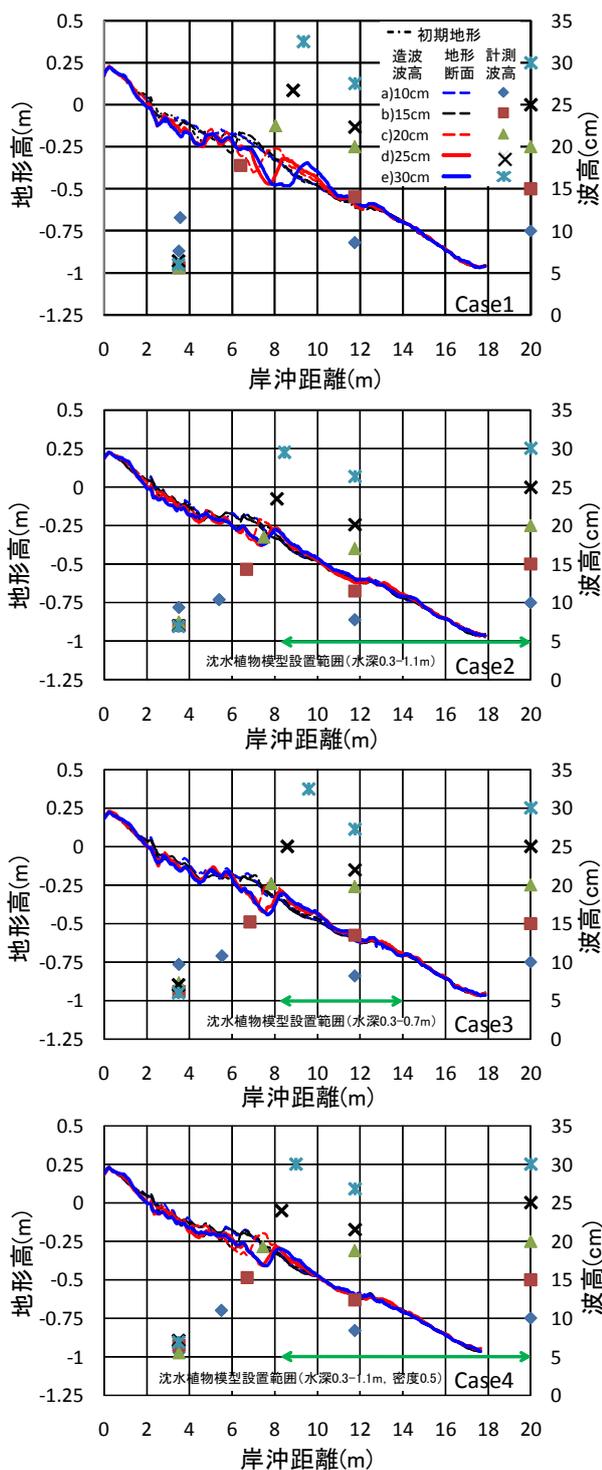


図-2 各ケースにおける地形断面と波高値

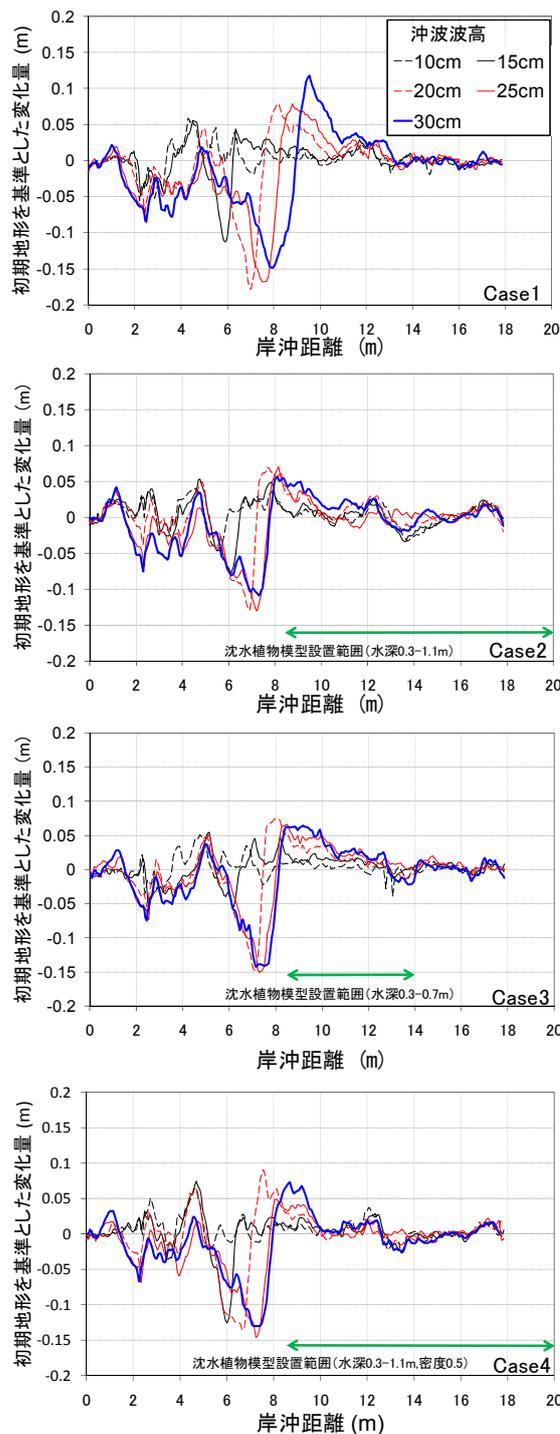


図-3 地形変化量

3. 実験結果

(1) 地形計測結果と波高値

a) Case1 (沈水植物模型なし)

波高は砕波点で最も高くなり(計測波高の分布範囲: 約 12-33cm), 砕波後に著しく減少した(計測波高の分布範囲: 約 6-8cm) (図-2). とくに, Case1-d)25cm,e)30cm のように沖波波高 (H_0) が大きい場合は, 地形変化も大

きくなった. また, 砕波点と形成されるバーは, 沖波波高 (H_0) が高くなるにつれて沖側へと移動した. 図-3に初期地形断面を基準とした断面形状の変化量を示す. Case1 では, 沖波波高 (H_0) が高くなるにつれて, 変化の絶対量が大きくなっていった. 同図から, 沖波波高 (H_0) の増大は, 沖側のバーとトラフの発達を促進させていることが分かる.

b) Case2 (沈水植物模型設置水深 0.3-1.1m, 設置間隔 7cm) 波高および地形変化の特性は, Case1 と同様な結果を

示した. しかしながら, 砕波点の波高は, 約 3cm (Case1 と比較し約 10-15%) 減少しており, 波高分布も 10-33cm の範囲であった. 地形変化については, d) 25cm, e) 30cm のように, 沖波波高 (H_0) が高いケースにおいても沈水植物模型の設置箇所 ($h=0.3$ の地点) でバーの発達が止まっていた.

断面形状の変化量は (図-3), Case1 と比較し, バーとトラフの変形規模が小さくなっていた. さらに, 沈水植物模型設置内では, 地形変化量が小さくなり, 地形の安定化が促されていた. このことより, 沈水植物模型の設置は波浪を低減させるとともに, 砂移動を抑制するものと考えられる.

c) Case3 (沈水植物模型設置水深 0.3-0.7m, 設置間隔 7cm)

波高および地形変化の特性は, Case1,2 と同様な結果を示した. 波高は砕波点で約 10-33cm の範囲, 砕波後に約 6-10cm の範囲で推移した. 波高の低減効果は, a)-d) の条件で見られたものの, e)30cm の条件では Case1 の波高とほぼ同じで, 波高の低減効果は見られなかった. 地形変化については, Case2 と同様に植物設置箇所 ($h=0.3$ の地点) でバーの発達が止まっていた.

断面形状の変化量は (図-3), Case1 と比較して小さく, Case2 と比較して大きくなっていた. さらに, Case2 と比べると, バーより岸側にあるトラフの発達が顕著になり, 深さの規模としては植物の無い場合と同程度となっていた. これは, 植物模型量の減少に伴い, 波浪の低減効果が小さくなることで, 模型背後の底質が移動, 洗掘され易くなり, 結果としてトラフの発達が促されたのではないかと考えられる.

d) Case4 (沈水植物模型設置水深 0.3-1.1m, 設置間隔 14cm)

波高および地形変化の特性は, Case1 と同様な傾向を示した. また, 波高の低減効果も Case2 と同様に全てのケースで見られた. 地形変化については, Case2 と同様に植物設置箇所でバーの発達が止まっていた. 断面形状の変化量は (図-3), その絶対変化量が Case1 と比較すると小さく, Case2 と比較すると大きくなっていた. Case3 では e)30cm の波を低減させることはできなかったものの, Case4 では低減が確認された. したがって, 波高の低減は, 設置密度よりもむしろ設置範囲による効果の方が高いと考えられる.

(2) 沖波波高 H_0 と計測地点波高 H との関係

a) 砕波前の波高特性

図-4 に沖波波高 (H_0) と砕波点ならびに地点 A における波高 (H) との関係を示す. 砕波前 (地点 A) の波高 (H) は, 各波高 (H_0) の中で Case2 が最も低い. また, Case1 と Case3 を比較すると, Case3 の $H_0=10, 15\text{cm}$ の条件で波高 (H) が若干低いものの, $H_0=20-30\text{cm}$ の条件では波高 (H) はほとんど変わらない. Case1 と Case4 を比較すると, Case2 ほど顕著ではないが, 波高条件にかかわらず波高 (H) が低くなっている. したがって,

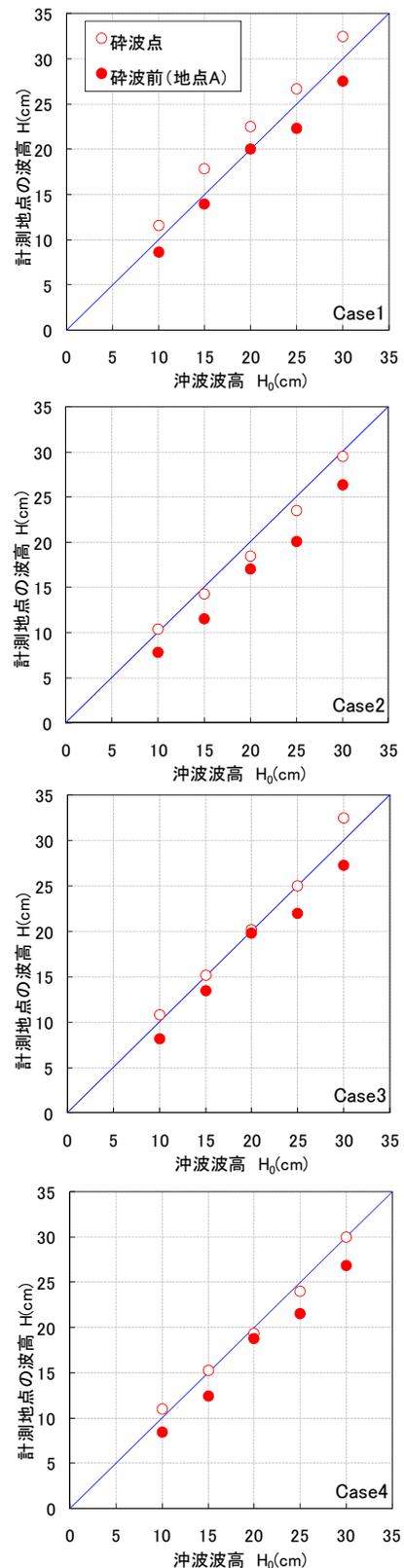


図-4 沖波波高と計測地点波高との関係

沈水植物の設置範囲, 設置密度によって異なるが, 波高減衰は砕波前に生じているものと考えられる.

b) 砕波点での波高特性

砕波点での波高 (H) は, 地点 A での砕波前の波高と同様にいずれの条件でも Case2 で最も低い. また, Case3

は Case1 と比較すると, $H_0=10-25\text{cm}$ の場合において波高が小さくなっているが, $H_0=30\text{cm}$ の場合には Case1 とほぼ同じ値を示した。

Case4 では Case2 ほどではないが, Case1 と比較しいずれの条件でも波高 (H) が小さくなっていた。ただし, Case4a)10cm,b)15cm の場合には Case3 よりも 0.1-0.2cm と若干であるが高い波高 (H) を示した。この違いは, 波を低減させる範囲の沈水植物モデルの密度が関係しているものと考えられる。すなわち, 波高が小さい場合は, 水深方向へ与える波の影響も小さくなるので, その箇所のモデル密度が高いか少ないかが, 波の低減に大きく寄与するものと考えられる。

(3) エネルギー低減率

a) 砕波前のエネルギー低減率

図-5 に砕波前後でのエネルギー低減率を示す。

砕波前のエネルギー低減率は, Case2 で顕著に見られた。とくに Case2 の $H_0=15\text{cm}$ の場合にエネルギー低減率が約 39%であった。ただし, このエネルギー低減率は, 沖波波高が高まるに連れて徐々に低下した。

Case3 では, 砕波点より沖側のエネルギー低減率の効果が $H_0=15\text{cm}$ でも 10%以下で, 沖からの波浪をほとんど低減できていなかった。

Case4 では, Case2 と同様な低減傾向を示した。 $H_0=15\text{cm}$ の場合にエネルギー低減率が約 26%であった。ただし, このエネルギー低減率は, 他ケースと同様に沖波波高が高まるに連れて徐々に低下した。

b) 砕波点のエネルギー低減率

砕波点のエネルギー低減率は, Case3 を除き上述した砕波前のエネルギー低減率とほぼ同様で, 砕波点でのエネルギー低減率の方が高い傾向にあった。エネルギーを最大に低減したケースと条件は, Case2 の $H_0=15\text{cm}$ の場合で, エネルギー低減率は約 42%であった。Case3 については, 砕波点前のエネルギー低減率とは異なり, 各波高条件で高い低減効果を見せた。例えば, 砕波点のエネルギー低減率は, Case2 と同様に $H_0=15\text{cm}$ の場合に高く約 32%であった。

(4) 沖波波高 H_0 と遡上高さの関係 h_R

図-6 に沖波波高 H_0 と遡上高さ h_R の関係を示す。遡上高さは, 全てのケース, 波高の中で Case2 が最も低かった。Case1 と Case2 の遡上高さの差は, $H_0=25\text{cm}$ の時に 5cm と最大となり, それよりも波高が大きくなるか, あるいは小さくなると差が減少した。また, Case1 と Case3 を比較すると, $H_0=20\text{cm}$ の時に 3cm 低減することなど, $H_0=10-25\text{cm}$ で遡上高さの低下が見られるが, $H_0=30\text{cm}$ の場合は, Case2 同様, 遡上高さの低減があまり見られなかった。一方, Case1 と Case4 を比較すると, 全ての沖波波高において遡上高さの低下が見られる。ただし, $H_0=10\text{cm}$ (Case4-a) の場合は Case3 よりも遡上高さが高

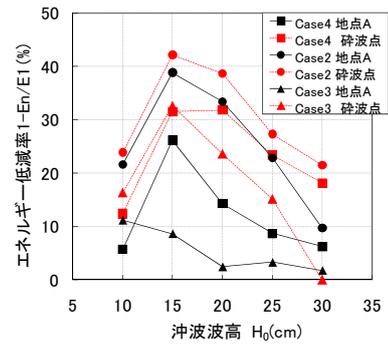


図-5 各ケースのエネルギー低減率

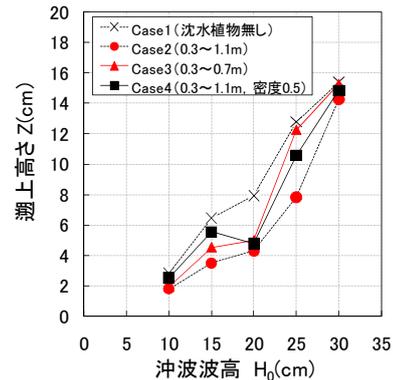


図-6 各ケースの平均遡上高さ

い。この傾向は, 図-2 に示す砕波点の波高値やバーム高さと相関が高い。つまり, 砕波高が十分に低減すれば, 遡上高さにも影響することを示している。このように沈水植物の波浪低減効果は, 湖岸への遡上距離を小さくし, ヨシ等の湖岸帯植生の発達に有利に働くことになろう。

4. 考察

本研究では, 沈水植物の波浪低減効果を明らかにすることを目的として, 二次元大型実験水路を用い, 波動場における模型植物による地形形状の変形および地形変形に伴う波高や遡上高さの減衰効果に着目して検討してきた。以下では, まず, 沈水植物の有無が地形変形にどのように寄与しているのかについて, 次に, 波浪エネルギーの低減効果についての考察を行う。

(1) 沈水植物の有無が地形変形に与える影響

Case1 では明瞭なバー, トラフの発達が見られるとともに, 沖波波高の増加に伴いバーの位置 (図-2), 変化量 (図-3) が大きくなっていった。この傾向は, 沈水植物模型を設置した Case2-4 でも同様であった。したがって, 沖波波高の増大は, 沈水植物模型の有無に係わらず, 岸側のバーとトラフの発達を促進させるものと言える。

しかしながら, バーの移動および地形変形の変化量については, 沈水植物模型の有無により大きな違いがあっ

た。Case2-4 では、沖波波高を大きくしても沈水植物模型を設置した位置よりも沖側へとバーが移動していないこと、また、沈水植物模型の設置位置では、地形変化量が小さくなっていたことがあげられる。すなわち、沈水植物の設置は、安定した地形が形成されやすく漂砂制御の効果が期待できることが考えられる。なお、本実験条件では確認できなかったが、より波高を高め、沈水植物模型帯の基盤そのものが破壊されるような波浪となれば、その抑制効果は期待できないであろう。

(2) 沈水植物模型の波浪エネルギー低減効果

Case3 と Case4 は、Case2 と比較し前者は設置範囲を半分以後者は密度を半分に変化させた比較実験である。砕波前（地点 A）のエネルギー低減効果は、Case3 の方が Case4 と比較して著しく低い（図-2）。また、破碎点のエネルギー低減効果についても、例えば $H_0=30\text{cm}$ 時に Case3 で 0%となるなど、Case4 と比較し低い。もちろん、Case4 も Case2 ほどまでの低減率ではなかったが（図-5）、低減効果の傾向は同じと考えて良い。

以上から推察するに、沈水植物による波浪低減には、沈水植物を狭い水深帯（地形変化の限界水深以浅を指す）で密集させて設置するよりも、波の浅水変形の起こり始める水深（本実験では $h=1.75\text{m}$ ）¹³⁾から汀線付近までと広く（深く）設置する方が、波浪低減に有効であると考えられる。また、 $H_0=10\text{cm}$ の波ではいずれのケースでも減衰効果が低い。これは沖波波高が小さい場合、鉛直方向へのエネルギー伝播が小さいため、抵抗となる沈水植物模型の葉が水に与えるエネルギー低減作用を十分に発揮できないことに起因するものと思われる。

つまり、減衰効果を発揮するには、波が作用する位置に植物体が密にあることが重要であると言える。この際、沈水植物の葉は波に対して揺動しつつも、葉に働く摩擦作用によって、波浪エネルギーが低減し、結果として砕波点の波高が減少するものと思われる。

5. 結論

本実験では、大型実験水路を用い、霞ヶ浦湖岸 1/2 縮尺で沈水植物の設置範囲および設置密度を変化させ、沖波波高 $H_0=10\text{-}30\text{cm}$ の波に対する波浪低減効果を検証した。実験結果より、波浪低減効果は沈水植物模型の設置範囲と設置密度が大きく関係していた。実験ケースの中で模型設置範囲、設置密度が最大条件での波浪低減効果は、最大で約 42%（Case2- $H_0=15\text{cm}$ ）となった。また、沈水植物は高い波浪低減効果だけでなく砂移動を抑制する漂砂制御効果があり、砂浜の安定化に大きく寄与する可能性が高いことが分かった。本実験では、沈水植物を模擬した紐を利用し以上の知見を得たが、実際には葉の形状、群落の高さ、規模（密度）も様々で、その低減効

果は一樣とは限らない。今後は、形状の異なる葉がエネルギー減衰にどの程度寄与するのか、現場での実波浪低減効果と併せて検証する必要がある。また、さらなる実験・解析を通じて、沈水植物が有する波浪低減メカニズムの解明を行ってゆきたい。

謝辞：本実験を行うにあたり、実験場を貸与いただいた国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室の皆様にご感謝いたします。また、滋賀県立琵琶湖博物館芳賀裕樹氏には、琵琶湖の沈水植物の現況について貴重な資料をご提供いただいた。実験準備、観測等については、当チーム交流研究員佐貫方城氏、（株）水圏コンサルタント賀上裕二次長、清水達也氏にご助力いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sakurai Yoshio: Decrease in vegetation area, standing biomass and species diversity of aquatic saprophytes in Lake Kasumigaura(Nishiura) in recent years. Japanese Journal of Limnology, vol.51, pp.45-48, 1990.
- 2) 山室真澄, 浅枝隆: 湖沼環境保全における水生植物の役割, 水環境学会誌, vol.30(4), pp. 181-184, 2007.
- 3) 天野邦彦, 大石哲也: 霞ヶ浦における沈水植物群落の消長と環境変遷の関連性解析に基づく修復候補地の抽出, 水工学論文集 (CD-ROM), vol.53, 2009.
- 4) 牧岩男: びわ湖の内湾における魚類と餌生物の関係, 生理生態, vol.12 pp.259-271, 1964.
- 5) Gulati, R.D., van Donk, E.: Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: review of the state-of-the-art, Hydrobiologia, vol. 478, pp.73-106, 2002.
- 6) 芳賀裕樹: 琵琶湖南湖で見られる沈水植物の増加について, 日本水産学会誌, vol.74(5), pp.892-894, 2008.
- 7) 浅野敏之, 筒井勝治, 酒井哲郎, 海藻が繁茂する場の波高減衰の特性, 海岸工学論文集, vol.35, pp.138-142, 1988.
- 8) 菅原一晃, 永井紀彦, 波による堤体前面の洗掘, 海岸浸食に対する人工海草の防止効果, 海岸工学論文集, vol.39, pp.461-465, 1992.
- 9) 伊福誠, 人工海藻による波・流れの制御と漂砂, 海岸工学論文集, vol.44, pp.536-540, 1997.
- 10) 林建二郎, 萩原運弘, 上正一, 藤間功司, 重村利幸 水辺植生の水理特性について, 海岸工学論文集, vol.45, pp.1121-1125, 1988.
- 11) 小林昭男, 宇多高明, 野志保仁, 芹沢真澄: Coral reef における砂浜発達モデル化, 海洋開発論文集, vol.24, pp. 1231-1236, 2008.
- 12) 宇多高明, 芹沢真澄, 熊田貴之, 加留部亮太, 三浦正寛: 沿岸漂砂量, 波による地形変化の限界水深および波候特性の関係, 海洋開発論文集, vol.18, pp. 803-808, 2002.
- 13) 合田良實, 佐藤昭二: 新訂版 海岸・港湾, 彰国社, pp. 28-30, 1981.

(2009. 9. 30 受付)