

湖沼における沈水植物が有する波浪減衰特性 — 琵琶湖での実観測をもとにした波浪減衰効果の検討 —

The wave damping effect by submerged plants based on real wave observation in Biwa Lake

大石哲也¹・三輪準二²

Tetsuya OISHI and Junji MIWA

The purpose of this study is to show the damping effect of the wave force by submerged plants in lakes and how the damping effect of it have been affected by differences with or without submerged plants and their rate. On survey line, which length was 400m from lakeside to offing, in Biwa Lake, we recorded continuously the wave height by the submerged plants at 5 points using pressure instrumentations. As a result, the damping effect was due to the plant cover ratio and the depth. On the maximum damping decreased by a factor of 0.71 compared with the case without the plants when the plant cover ratio was 100%. Moreover, we suggested how to calculate the damping factor by between the plant cover ratio and a density factor($k\rho$) of the plants.

1. はじめに

沈水植物は、川・湖・海で底に根を下ろして水中で生育する植物である。近年、世界各国で湖沼の沈水植物群落が減少し、湖沼生態系の劣化が危惧されており、この再生に向けたプロジェクトが行われている。沈水植物が湖沼生態系に果たす役割としては、仔稚魚の産卵場(牧, 1964)、透明度の向上(Gulatiら, 2002; 山室ら, 2007; 芳賀, 2008; 天野ら, 2009)などがあり、現地観測、実験、解析等を通じ、水域における一次生産者としての生態学的側面からの検討例が多い。

一方、沈水植物の水理学的側面についての知見は、これほど多くなく、とくに本報で示す沈水植物が有する波浪減衰効果の検討例は筆者の知る限り少ない。例えば、海洋での検討例として、海岸浸食を保全するため草丈があまり大きくないアマモや、アマモを模擬した人工海藻を用いて、波浪・漂砂制御あるいは洗掘に関する観測や解析が数例あり、一定の効果があることが知られている(浅野ら, 1988; 菅原ら, 1992; 伊福, 1997; 林ら, 1988)。この他、湖沼での検討例として、上記のアマモとは異なり、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ことから、波浪減衰効果が海洋よりも高いと考えられている(大石ら, 2010)。

そこで本研究では、沈水植物帯の水理学的な効果を示すことで、沈水植物再生へ向けた一助となることを目的とし、とくに沈水植物の有無、植被率の違いが波高減衰

効果にどの程度影響しているのかを実観測データから明らかにした。

2. 観測概要

(1) 対象測線の設定と波高観測

対象箇所は、琵琶湖(滋賀県)の長浜市湖岸で、岸から沖に400mの測線を設け平成22年9月下旬~11月上旬にかけて行った(図-1)。この測線の特徴としては、岸から20-40m(植物帯A)、130-145m(植物帯B)に密な沈水植物帯があることがあげられる。

観測は、植物帯A、Bの岸側・沖側、岸から400m地点の計5地点に波高計(INFINITY-WH, JFEアドバンテック(株))を設置し、沈水植物有りの観測(期間1)として10月13日から29日まで行った。観測サンプリング時間は、0.1秒間隔で20分の連続観測(データ数: 12,000個)とし、測定間隔を1時間とした。次に、測線上の周辺部を含めて植物帯を刈取り、植物帯無しの観測(期間2)として、先の観測地点と同位置で10月29日から11月

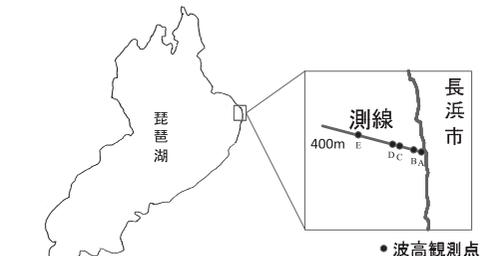


図-1 波高観測点と対象測線の概略図

1 正会員 工博 (独法)土木研究所 水環境研究グループ
自然共生研究センター 研究員
2 正会員 工修 (独法)土木研究所 水環境研究グループ
河川生態チーム 上席研究員

3日まで観測を行った。なお、波高データには、有義波高を用いることとし、深度 (m) データの長周期成分を高速フーリエ変換 (FFT) で除去したのちに、風波成分 (短周期側) についてゼロダウンクロス法によって波別解析を行い、有義波高 (H1/3) を算出した。

(2) 測線上における環境変化の計測

測線上の環境変化を知るため、地形高、粒径、植生 (種類、植被率) を調査した。地形高および粒径は、現地で地形勾配や粒度分布の変化点に配慮しながら、沖方向に400mの測線上を5~20mピッチで観測開始前 (9月27日)、期間1の終了日 (10月29日のみ 波浪が大きく180mまで計測)、期間2の終了日 (11月3日) の計3回行った。また、地形高の計測は、湖水面からの差分により測深を求めた。なお、測深は、ゴムボードを用いて、湖面からスタッフを用いて計測した。粒径は、沖方向に200mまでは5mピッチ、以降は10m~20m間隔で、湖底表層 (深さ約10cm) の土壌を採取し、粒度を確認した。

植生は、10月7日に測線上から50cmの幅にある植物を対象とし、約5m間隔で沈水植物の種類と植被率について調査した。

(3) 波高減衰効果の検討

波高減衰定数 (K) は、植物帯への波入射前と通過後の波高を図化し、線形近似した傾きにより求めた。次に、この波高減衰定数 (K) をもとに、消波工内における減衰進行波の波高式 (Madsen, 1974) により植物帯の密度係数 ($k\rho$) を求めた。ここで、植物帯における減衰進行波の波高に関する基本式を式 (1) に示す。なお、本検討では、沈水植物群落内における浅水変形、回折変形については考慮しない。

$$\frac{H(x)}{H(0)} = e^{-k\rho x / 2\sqrt{gd}} \dots\dots\dots (1)$$

x : 植物帯幅, H : 植物帯通過中における進行波の波高,
 $k\rho$: 植物帯の密度係数, g : 重力, d : 水深

最後に植物帯の密度係数 ($k\rho$) と植被率 (ka) との関係について整理し、植物帯の植被率を考慮した算定式を示した。

3. 結果と考察

(1) 波高データ

隣接する波高観測地点 (St.A~St.E) ごとに有義波高を整理した時系列図を図-2に示す。まず、植物帯Aにおける波高変化を比較するため、波浪時におけるSt.AとSt.B (図-2(a)) について見る。期間1では、全体的な傾向としてSt.Aの方がSt.Bと比べて有義波高が低い。一方、沈水植物を刈取った期間2では、両観測地点の波高値に大きな差は見られず、むしろ、期間1の後半から期間2

でこの関係が逆転するような場合もあった。

次に、植物帯Bにおける波高変化を比較するため、波浪時におけるSt.CとSt.D (図-2(c)) について見る。植物帯Bでの変化は、植物帯Aの現象とは異なり、期間1、2ともに全体的な傾向として両者の有義波高に大きな変化はない。

したがって、今回の波浪期間では、植物帯Bよりも植物帯Aの方が、波高減衰がより大きく働いていたと考えられる。また、植物帯Bで減衰効果があまり働かなかった理由として、植被率が小さいということ、水深が深いと減衰効果が小さくなること (例えばMasselら, 1998) や、沖波波高が大きくない場合、鉛直方向へのエネルギー伝播が小さくなるため、抵抗となる沈水植物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 (大石ら, 2010) ことが推察される。

また、図-2(b), (d) の波浪時における波高変化を見ると、両者の間に大きな差はなく、異常な波形も無い。測線の設定は卓越風に対して直角方向で、地形も比較的なだからで、周辺に突堤などの障害物がない箇所に設定しており、設定した測線が波浪減衰効果を確認するうえで適当な測線であったことを示すものと考えられる。

(2) 測線上の環境変化

図-3に観測期間中の地形高の変化を示す。観測開始前 (9/27) から期間1の終了時 (10/29) にかけての地形変化はみられなかった。一方、沈水植物を刈取ってから期間2終了時 (11/3) にかけての地形変化は、各所で凹凸が生じていた。この期間の地形変化の状況 (11/3の測線参照) は、沖合約150m~200m地点および330m~375m地点において大きな浸食と堆積が交互にあり、植物体Bでも多少の浸食があった。

図-2より、この浸食は、期間中に生じた10月30日と11月1日~2日の高波浪にできたものと考えられる。ただし、今回の大きな浸食は、植物帯の刈取りによる影響というよりも、後者の高波浪によって生じた可能性が高い。この理由としては、前者の波高と同様な波高 (最大で15cm) は、期間1にもある (10月26日) もの、期間1終了時の測線 (10/29) には植物帯Bより沖側 (150mより沖側) に浸食が生じていないことがあげられる。

粒度については、測線上で沖方向距離400mまでに約3パターンの粒径特性が見られた (図-4)。すなわち、0~120mまでは礫・砂、125m~240mまでは主にシルト混じり粘土、260m~400mまでは主に砂混じり礫となっていた。また、観測開始前と終了時の両方で、粒度特性に変化は見られなかった。粒度特性からみると、植物帯Bの辺りから細かな成分が多く、地形変化が生じやすいと考えられる。図-4に測線上の植生状況を示す。植物帯Aの植被率は平均で100%と高いが、植生帯Bの植被率は平

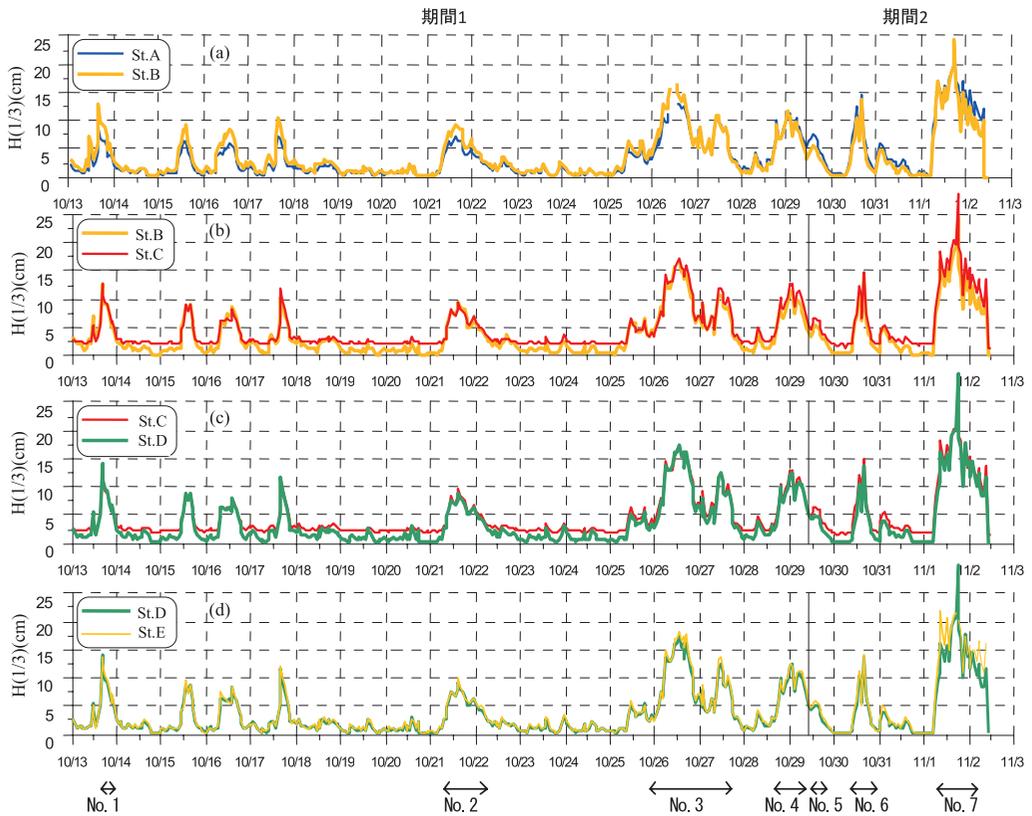


図-2 植物帯での1/3有義波高と減衰効果の検証に利用した波高期間 (No.1-No.7)

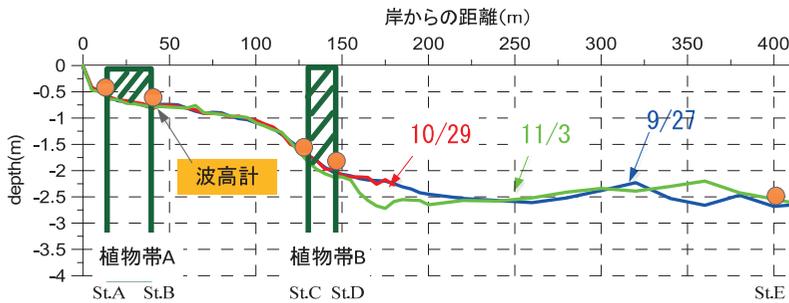


図-3 植物帯および計測器機の位置と横断測線の変化

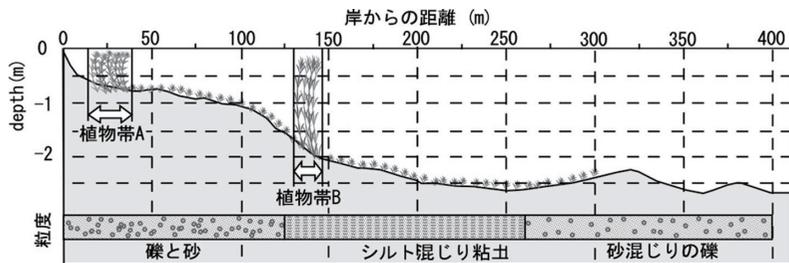


図-4 粒度分布と植生状況

均で65%と低い。測線上には、ササバモを中心とし、クロモやマツモなどの葉の密集する植物が多く占めてい

た。なお、植物帯Bから沖側には、草丈の小さな植物が多くあり、この区域の地形変化の激しさを示していた。

また、沈水植物の生育状況から期間2終了時の測線変化を鑑みるに、植物帯Bの沖側で大きく浸食が進んでいる理由として、植物帯があることで岸方向への浸食が低減されたのではないかと推察される。すなわち、植物帯Bにあるササバモは地下茎をよく発達させることが知られており（例えば浜畑，1996）、根の緊縛効果によって土壌の浸食が進まなかったのではないかと考えられる。また、このような効果は、実験でも確認されており（大石ら，2010）、地下茎が十分に発達していない植物体Bの沖側で浸食が生じたのではないかと考えられる。

(3) 植物帯の波通過前後の波高変化

図-2に示すNo.1～No.7の期間での植物帯A, Bの波入射前の波高 (HB, HD) と、植物帯間の波高比 (HA/HB, HC/HD) との関係について、図-5に示す。植物帯Aでの期間1 (図-5 (a)) のNo.1, 2において、波入射前の波高HBが増大するにしたがって波高比HA/HBは緩やかであるが低下していた。No.1,2での波高比は0.6-0.8辺りに多く分布しており、植物帯による減衰効果が現れていた。

No.3では、No.1,2同様に波高比が0.8辺りに分布するものと、1.0近辺から上に分布するものに分かれる。図-5(a)にNo.3での時間経過を破線で示しているが、これはNo.3における高波浪前～ピーク時～高波浪後にかけての変動を示したものである。No.3においては、時間経過と共に波高比が大きくなっていることがわかる。これは、No.3の高波浪時に植物帯Aの沈水植物が波によって破壊され、密度が著しく低下し、波高比が大きくなった可能性が高いと考えられる。実際に、10月27日に確認したところ、岸には生きた植物が多く打ち上げられており、植物帯Aの植被率は40%まで低下していた。

No.1～No.4の全体を通してみると、時間経過と共に波高比 (HA/HB) が徐々に増大していた。これは、時間経過とともに、波浪の影響により破壊されたり、気温が下がることで沈水植物が枯れ始めたりし、植物帯Aの密度が少しずつ低下した結果ではないかと考えられる。

一方、植物帯Bでは、期間1のNo.1においてHDが5cm以上のときに波高比 (HC/HD) が1.0を下回っていたが、No.2～4の期間では、波高比はいずれも1.0を超えていた。また、植物帯Bにおいても植物帯A同様に、変動は小さいものの時間経過と共に波高比 (HC/HD) が大きくなっていった。

したがって、上記の検討から植物帯の波高減衰効果は、植物帯BよりもAの方が高く、かつ期間1の中でも観測初期の頃 (10月中旬) の方が高いことが分かる。

(4) 沈水植物の波高減衰効果

ここでは、沈水植物による波高減衰効果を算定するため、植物帯による減衰効果があり、植被率が分かっている近傍の観測データを用いて検討を行う。まず、植物帯

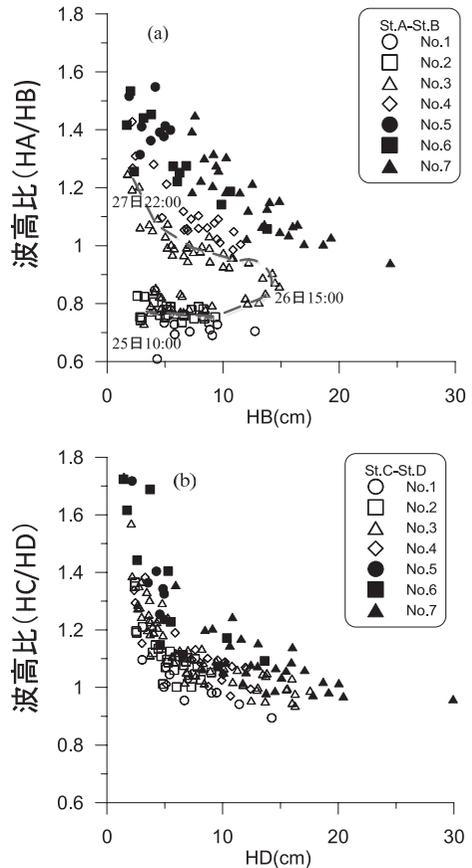


図-5 植物帯への波入射前の波高 (HB, HD) と波高比 (HA/HB, HC/HD) との関係

A, Bの通過前後の波高を図化し、それぞれの波高減衰定数を図-6に例示するとともに、この一覧を表-1に示した。次に、植被率のわかる期間の近傍データである植物帯AのNo.1, No.03 (波浪後) と、植物帯BのNo.1の期間で、植物帯への波通過前後における波高をプロットし、近似線の傾き (fit line) による波高減衰定数を求めた (図-6)。この傾きにより、植物帯AのNo.1の減衰定数 (K) は0.71, No.3 (波浪後) のKは0.98, 植物帯BのNo.1のKは0.96であった。なお、この結果は大石ら (2010) が行った大型実験水路で得られた結果 (減衰定数 (K) は0.8前後) からみても妥当な結果と考えられる。

この値を元に式 (1) 左辺へ代入し、植物帯の密度係数を求め、植被率 (ka) との関係について整理した (図-7)。以上の点から、植物帯の密度係数と植被率の関係として、

$$k\rho = 0.1449 ka - 0.0594 \quad (0 \leq ka \leq 1.0, 0 \leq k\rho) \dots (2)$$

の式 ($R^2=0.95$) が得られた。

また、同式より沈水植物による減衰効果は、植被率が40%を下回ると著しく低減することが示唆された。

式(2)は、密度係数から植被率を求めることが可能であり、ここでは試みとして、減衰定数が1.0以下で適用可能な植物帯AのNo.2期間で植被率を求めた(図7参照)。結果として、No.2の植被率は92%と推定された。観測期間中の気温変化は、27日以降に最低気温が10℃を下回る日が急に多くなっているものの、No.2の期間(21日)には気温の低下はみられず、植物帯が大きく枯死するような気候ではなかったと考えられる。推定した植被率の数値は、波浪減衰率も高いことから、それほど外れてはいないものと考えられる。

以上から沈水植物の波浪減衰特性について考えると、消波構造物とは異なり、暴風時の消波効果を期待するものではないが、多少の高波浪時に抵抗する波浪減衰効果があること、砂州の浸食防止効果(固定効果)が見られること、さらに、以上の効果から、植物が旺盛に生育する夏季における湖岸帯への波浪軽減効果をもたらすことで、湖岸に生育するヨシなどの抽水植物の生育地の浸食防止にも一躍を担う可能性があることが考えられる。

4. まとめ

本研究では、沈水植物帯の水理学的な効果を示すことで、沈水植物再生へ向けた一助となることを目的とし、とくに沈水植物の有無、植被率の違いが波高減衰効果にどの程度影響しているのかを実観測データから明らかにした。具体的には、琵琶湖(長浜市)で、卓越風に対し直角になるように湖岸から沖まで400mの測線を設置し、測線上に発達する水深、植被率の異なる2つの植物帯で波高の連続観測を行った。観測結果をもとに波高(1/3有義波高)を分析し、植物帯での波高減衰の特性を求めた。結果および考察から、以下の結論を得た。

- ・沈水植物帯の波高減衰定数(k)は、植物量が多い時期(No.1,2)の植物帯Aで約0.75であった。
- ・沈水植物帯の波高減衰効果は、沈水植物帯がある箇所での水深、植物帯幅、密度の影響を受けており、植被率が40%を下回ると減衰効果が著しく低減することが示唆された。
- ・植被率(ka)と植物帯の密度係数(kρ)の関係から $k\rho = 0.1449 ka - 0.0594 (0 \leq ka \leq 1.0, 0 \leq k\rho)$ が得られ、植物帯を考慮した減衰定数の算定に利用可能となる。

参考文献

浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎(1988): 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.
 天野邦彦・大石哲也(2009): 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, vol.53, pp.1369-1374.

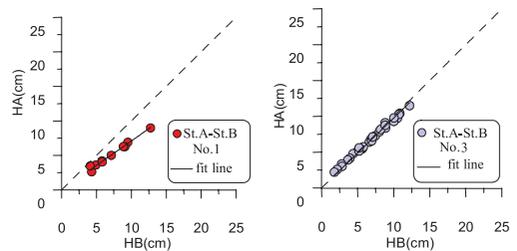


図-6 波高減衰定数の算出例(No.1とNo.3(ピーク後) - fit lineの傾きが減衰定数を示す -

表-1 波高減衰定数

波浪区間	No.1	No.2	No.3 (前)	No.3 (後)	No.4	No.5	No.6	No.7
植物帯A	0.71	0.76	0.8	0.98	1.06	1.41	1.17	1.13
植物帯B	0.96	1.08	1.07	1.06	1.06	1.35	1.16	1.06

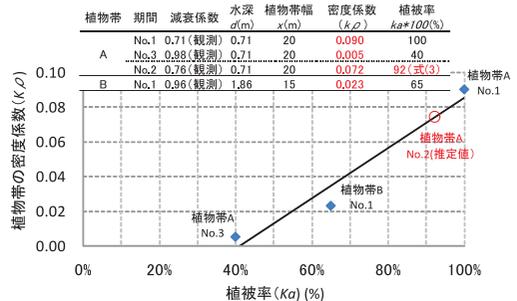


図-7 植物帯の密度係数と植被率との関係

伊福 誠(1997): 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.
 大石哲也・三輪準二・熊田貴之・野志保仁(2010): 沈水植物の波浪低減効果に関する研究, 水工学論文集, vol.54, pp.1531-1536.
 菅原一晃・永井紀彦(1992): 波による堤体前面の洗掘, 海岸浸食に対する人工海藻の防止効果, 海岸工学論文集, vol.39, pp.461-465.
 芳賀裕樹(2008): 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.
 林 建二郎・萩原運弘・上原正一・藤間功司・重村利幸(1988): 水辺植生の水理特性について, 海岸工学論文集, vol.45, p.1121-1125.
 牧 岩男(1964): 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.
 山室真澄・浅枝 隆(2007): 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.
 Gulati, R.D., E. V. Donk (2002): Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: review of the state-of-the-art, Hydrobiologia, vol.478, pp.73-106.
 Madsen, O.S. (1974): Wave transmission through porous structure, Proc. ASCE, WW3, Vo.100, pp.169-188.
 Massel, S.R.; K. Furukawa; R. M. Brinkman (1998): Surface wave propagation in mangrove forests, Fluid Dynamics Research, vol.24, pp.219-249.