

# 湖沼における植生護岸の形成とその効果

林 建二郎\* ・木村保夫\*\*・鈴木正幸\*\*\*  
萩原運弘\*\*\*\*・重村利幸\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

近年、環境問題の関心が高まり湖沼における抽水植物群落の持つ効果や機能も明らかにされ、その重要性が広く認識されるようになった。そうした中で湖岸における抽水植物群落の復元が各地で試みられるようになった(木村, 1996)。湖岸に抽水植物群落を復元するためには、波浪や土砂移動などの物理的環境条件に関する工学的知見と、抽水植物の成長特性に関する生態学的知見とをとりまとめた学際的な視点が必要とされる。

一般に、抽水植物の繁殖は種子や地下茎などの栄養繁殖器官によって行われる。湖岸における植物体の定着には、特にその初期の段階において風波の影響を著しく受ける。既設の湖岸堤の沖側に覆土を行った場合、従来の自然湖浜と比較して湖浜勾配が大きく、その前面の水深も深くなることから、風波の作用がより激しくなり、覆土が流出する場合も多い。そのため、抽水植物群落の湖岸への定着には何らかの方法によって波浪を減衰させることが必要である。しかし、風波を遮るために構造物によって閉鎖性水域を形成した場合、富栄養湖においては総じて水質が悪化しアオコの発生等が起り、かえって問題が生じる可能性が指摘されている(宇多ら, 1996)。

西島・宇多ら(1998)は、堀川・砂村ら(1974)の前浜浸食・堆積の判別式は湖岸植生の繁茂限界の判別式としても適用可能であることを見出し、その繁茂限界は前浜浸食・堆積の限界と同様に式中のC値=約4で与えられる実測結果を報告している。この様に湖岸における植物の定着には、波高、湖浜の勾配、および湖浜材料の粒径が相互に関連しているが、仮に、植物の生育に必要な安定した基盤が確保された場合、植物の定着は波浪のみに規定されると考えられる。定着後の植物は自身の成長によって、その茎葉は波浪を和らげ浮遊土砂を捕捉し、発達した根系は土壌を緊縛する。従って、現時点で植物群落が見られない立地条件でも、植物の成長のために安

定した基盤を提供することによって、植物自身その成長に必要な物理的環境条件を作り出すことが出来るのであれば、風波を遮るための物理的構造物を作る必要はなく、より自然な湖岸の形成が可能であると考えられる。

本研究は、1)波浪の影響を強く受ける現地において安定した基盤(植生ロール)に生育させたヨシの成長と、その植生護岸としての機能を調査すると共に、2)実際にヨシの苗を使用してヨシ群の波に対する反射・透過ならび動揺特性を室内実験により調べたものである。

## 2. 諏訪湖における現地調査

### 2.1 調査の概要

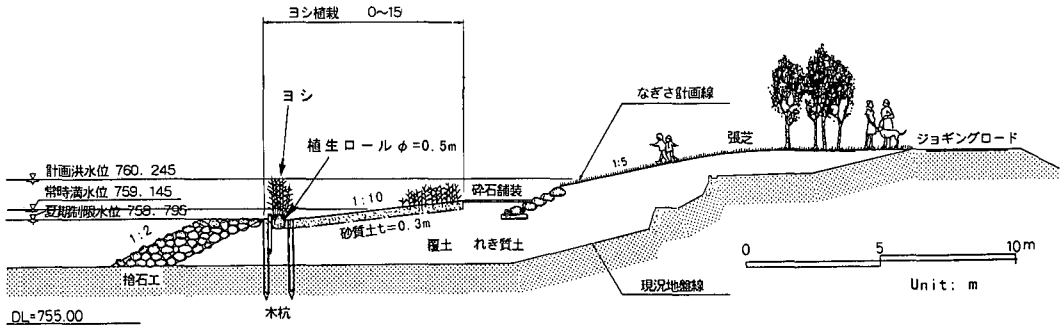
諏訪湖は長野県に位置する面積13.3 km<sup>2</sup>、平均水深4 mの比較的浅い湖である。諏訪湖の概要を図-1に示す。かつては「渋のエゴ」と呼ばれたいくつかの入江状の多様な水生植物群落が存在していたが、1949年以降湖岸の埋め立てが急激に進み、また1969年からは水深2.5 mより浅い湖底の大部分が浚渫された結果、今日では自然湖岸はほとんど消えている(沖野, 1997)。しかし、近年失われた自然を回復するために、人工渚の創出や湖岸での抽水植物群落の復元に対して積極的な取り組みが行われている。

図-2に示す今回調査を行った場所は、諏訪市の人工渚および抽水植物群落の創出を行った場所で、既存コンクリート湖岸堤前面に沖側から1/2の勾配で捨て石を行い、その背後にのり面勾配1/10程度で覆土(砂質土、平



図-1 諏訪湖の概略

\* 正会員 Ph.D. 防衛大学校助教 土木工学教室  
\*\* (株)ミック  
\*\*\* (株)ミック  
\*\*\*\* 正会員 工博 清水建設技術研究所環境技術開発部  
\*\*\*\*\* 正会員 Dr.E. 防衛大学校教授 土木工学教室



図一 植生護岸の概略

均粒径  $d_{50}$  ≈ 約 1 mm, 厚さ  $t=0.3$  m) が行われている。当初, 投入された砂質土は波浪によって流出し, 5 m 程度計画湖岸線が後退した。そこで, 波浪による湖岸の浸食を防ぐため, 計画湖岸線にあたる捨て石と覆土との境に直径 50 cm の植生ロール (安定した育成基盤) が, 計画湖岸線に沿って 60 m の間設置された。植生ロールは円筒形のポリプロピレンネットに高密度でヤシ繊維が充填された蛇籠状の素材である。土の代わりに育成基盤となるヤシ繊維は, 流水中においても流出することがないので波浪を受ける湖岸においても確実に植物を定着させることが期待できる。植生ロールには, 1 m あたり 8 株の割合でヨシ苗を植栽した。植生ロール設置部の水深は約 40 cm であり, その天端はほぼ静水面 (= 諏訪湖の常時満水位) の位置となっている。植生ロールは 1997 年 3 月 25 日に設置された。

## 2.2 波浪および C 値の推定

諏訪湖東岸に位置する長野地方気象台諏訪測候所発行の地上気象観測年統計値表によると, 1997 年 5~7 月および 10 月の月別の最多風向は南東であり平均風速は 2.5~3.1 m/s であった。その他の月の最多風向は西北西であり平均風速は 2.6~3.7 m/s であった。月別最大風速の最多風向は西北西であり最大風速値は 8.2~15.7 m/s であった。

Bretschneider 法を用いて本現場の波浪推定を行った。推定に用いた代表風速  $U$  は年平均風速に近い 3 m/s, 吹送距離  $F$  は西北西からの卓越風の吹送距離である 4.5 km とした (図一 参照)。得られた年平均の有義波高および有義周期は,  $H_{1/3}=0.12$  m と  $T_{1/3}=1.34$  s であった。植生の繁茂条件を支配する波は比較的高波浪と考えられる (西島・宇多, 1998) ので,  $C$  値の算定には便宜的に次式で示される波高  $H_p$  及び周期  $T_p$  を用いた。

$$H_p = 1.6 K_s H_{1/3} = 0.18 \text{ m} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$T_p = 1.2 T_{1/3} = 1.6 \text{ s} \quad \dots \dots \dots (2)$$

(1) 式中の, 倍数 1.6 は有義波高と平均波高の比,  $K_s$  は浅水係数である。(2) 式中の倍数 1.2 は有義波周期と平

均周期の比である (堀川, 1991)。 $C$  値は次式で示される。

$$C = H/L \cdot (\tanh \beta)^{0.27} \cdot (d_{50}/L)^{-0.67} \quad \dots \dots \dots (3)$$

上記の  $H_p$  と  $T_p$  より算定した波形勾配  $H/L=0.06$  と波長  $L=2.86$  m, および本湖浜の勾配  $\tanh \beta=1/10$  と湖浜材料の中央粒径  $d_{50}=1$  mm を (3) 式に代入して得られた, 本湖浜の  $C$  値は約 7 であった。従って, 本湖浜は浸食性湖浜であり, ヨシの自生による繁茂は困難である。

## 2.3 ヨシの成長と植生護岸

植生ロールへ植栽されたヨシの成長を見るために, 1997 年 6 月 3 日および 1998 年 6 月 25 日に現地観察を行った。また, 1998 年 8 月 21 日に植生ロール設置区間におけるヨシとその他の植物の分布状況を平板測量によって調べた。

植生ロールの設置に際しては, 現場の状況からその天端が常に水面上に出ている部分と, 5~10 cm 程水面下に沈んでいる部分とが生じた。設置から約 2 ヶ月後の 1997 年 6 月 3 日の時点において, 波浪が無い状態で常に静水面上に出ている部分では植栽されたヨシは高さ 20~30 cm に成長したのに対し, 常に水面下であった部分では植栽されたヨシは枯死してしまっていた (写真一 参照)。この結果, ヨシが初期の段階で定着した部分とそうでない部分, 即ち, 植生が存在する部分と無植生の部分とが生じた。その後, 設置からおよそ 1 年 2 ヶ月後の 1998 年 6 月 5 日の時点では定着したヨシは高さ 1.5 m 程度まで成長し, 湖岸前面にヨシ群落を形成した (写真二 参照)。

1998 年 8 月 21 日時点における抽水植物群落と湖岸の状況を図一 3 に示す。植生ロールには 3 カ所ほど植え付けたヨシが定着しなかった場所が生じたが, それ以外の場所では良好に成長した。その結果, ヨシ群落が形成された部分と無植生の部分とが生じた。無植生の部分では明らかに湖岸の浸食が進行していることが確認された (写真三, 写真四 参照)。

これに対し, 形成されたヨシ群落の背後では, マコモ, ガマおよびクサヨシなどの比較的大型な抽水植物の他に, 湿地に生育するオモダカやサジオモダカの生育が確

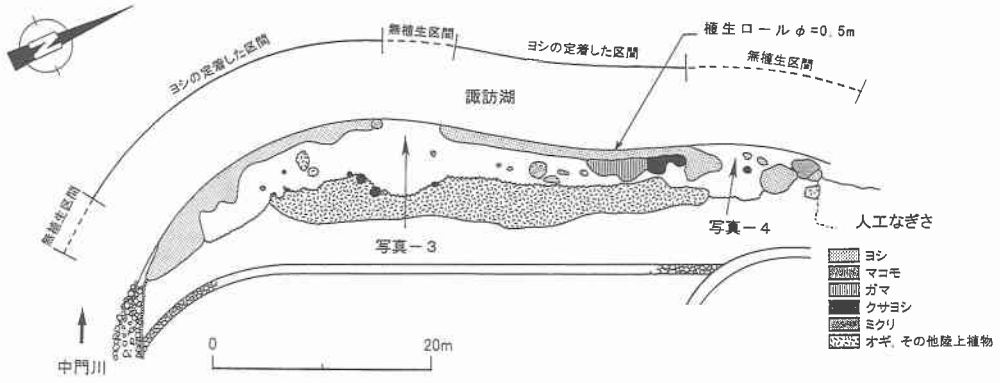


図-3 湖岸の植生状況 (1998年8月)



写真-1 設置から3ヶ月後の植生マットの状況



写真-3 無植生部分背後の湖岸浸食 (その1)



写真-2 設置から1年2ヶ月後のヨシ群落の形成



写真-4 無植生部分背後の湖岸浸食 (その2)

認められた。これらのことから、波浪によって流出しにくい安定した基盤 (植生ロール) に形成されたヨシ群落は、明らかに植生護岸として機能することが分かる。

### 3. 実ヨシ群の消波特性に関する室内実験

#### 3.1 実験装置および方法

ヨシ群の消波特性と耐波特性を調べるために、本現場のヨシと同種類のヨシ苗を用いた実物ヨシ群の反射・透過特性ならびに動揺特性を室内実験により調べた。

実験には、長さ 20 m、幅 40 cm、高さ 75 cm のフラップ式造波装置付き 2 次元造波水槽を用いた。水槽の他端には、勾配 1/13 の傾斜板に厚さ 5 cm のサンドマットをのせた消波装置を設置した。深さ 7 cm、5 cm 四方のポット内に育成されたヨシ束を、水路幅方向に 8 個、水路長さ方向に 30 個連続して敷設しヨシ群を作成し図-4 に示す様に設置した。ヨシ群の長さは  $B=1.5$  m である。ヨシ茎の平均高さは約 90 cm、茎の平均径  $D$  は約 0.15 cm、平均曲げ剛性  $EI$  は約  $5 \times 10^{-3}$  (Nm<sup>2</sup>) である。ヨシの植

生占有面積率 $\lambda$  (単位床面積に占める茎の合計断面積の割合)は約0.008である。

ヨシ群による波の反射率 $K_r$  (=反射波高 $H_r$ /入射波高 $H_i$ )と透過率 $K_t$  (=透過波高 $H_t$ /入射波高 $H_i$ )を計測するために、図-1に示す位置A, B, Cにそれぞれ容量式波高計を設置した。入・反射波の分離推定法を用いて $H_r$ と $H_i$ を算定した。ヨシの波に対する動揺特性を計測するために、ヨシ群の中央の位置Dにサーボ式波高計と光学式変位計を設置した。茎の静水表面上15 cmの位置に変位計の発信器を取り付けた。この位置をヨシの動揺変位の測定点とした。

実験水深は $d=50$  cmの一種類とした。作用波には周期 $T=0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0$  sを有する規則波を使用した。波形勾配 $H_i/L$  ( $L$ :波長)の範囲は0.002~0.09である。実験は12月に行った。

これら実験に先立ち、植生群を取り除き水槽他端に設けた斜面勾配1/13の消波装置自体の反射率 $K_r$ を計測した。上記、消波斜面からの波の反射は小さく、反射率は0.1以下であった。また、静水中における茎の平均固有周期 $T_{nw}$ と平均減衰定数 $\zeta_w$ をも自由振動減衰実験を行い調べた。 $T_{nw}$ =約0.92 s,  $\zeta_w$ =約0.27であった。

3.2 実験結果および考察

ヨシ群からの波の反射率 $K_r$ 及び透過率 $K_t$ の波形勾配 $H_i/L$ に対する変化特性を、水深波長比 $d/L$  ( $d$ :水深,  $L$ :波長)および周波数比( $f_w$ :作用波周波数,  $f_{nw}$ :ヨシの静水中における固有振動数)をパラメーターとして図-5と6にそれぞれ示す。反射率 $K_r$ は0.1以下であり、消波装置自体の反射率 $K_r$ も0.1以下であったので、ヨシ群からの反射はほとんど無いことが分かる。透過率は $0.65 < K_t < 0.9$ の範囲であり $H_i/L$ の増加に伴い若干減少している。 $d/L$ の影響は明確ではないが、 $f_w/f_{nw}$ が1に近い $d/L=0.45$ の場合の $K_r$ は多少大き目となっている。

透過率 $K_t$ の $B/L$  ( $B$ :ヨシ群の岸沖方向幅)に対する変化特性を $d/L$ および $f_w/f_{nw}$ をパラメーターとして図-7に示す。 $B/L$ の増加に伴い $K_t$ は減少すると予想さ

れるが(林ら, 1998),  $f_w/f_{nw}$ が1に近い $B/L=1.3$ 付近では増加が認められる。本実験と同様に実物のヨシ群の透過特性を2次元造波水槽内で調べたBouter (1991)の実験結果においても、類似な $K_t$ と $B/L$ の関係が報告されている。

ヨシ群中央Dで同時計測された水位変動 $\eta$  (上方向を正とする)とヨシの水平動揺変動 $x_p$  (岸方向を正とする)の時系列信号をフーリエ解析し、波高 $H_p$ とヨシの水平振動片振幅 $X_p$ , ならびに $\eta$ に対すると $H_p$ の位相遅れ $\phi$ を算定した。 $X_p/d$ と $\phi$ の $H_p/L$ に対する変化特性を、 $d/L$ と $f_w/f_{nw}$ をパラメーターとして図-8と9に示す。水平変位 $X_p/d$ は $H_p/L$ の増加および $d/L$ の減少に伴い大きくなる。位相差 $\phi$ は、 $H_p/L$ の増加に伴い増加している。ヨシの水平動揺が、線形な振動方程式で評価可能であれば、位相差 $\phi$ は周波数比 $f_w/f_{nw}$ で規定される。 $f_w/f_{nw}$ が1に近い $d/L=0.3$ と0.45の場合には、 $\phi$ は共振時の位相差である90度近傍の値を示しているが、 $H_p/L$ の影響も

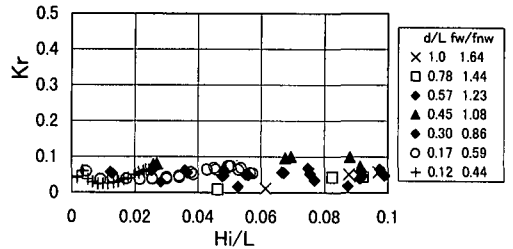


図-5 ヨシ群落の反射率と波形勾配の関係

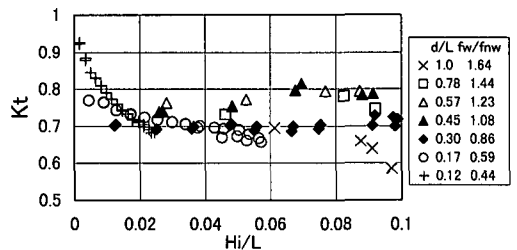


図-6 ヨシ群落の透過率と波形勾配の関係

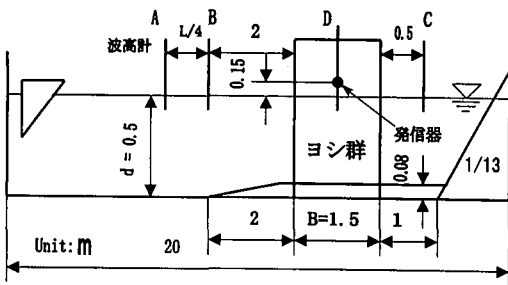


図-4 実験水槽の概略

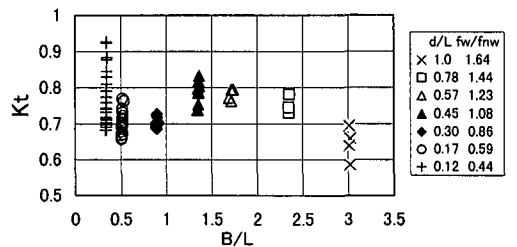
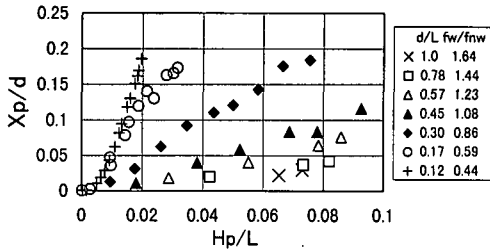
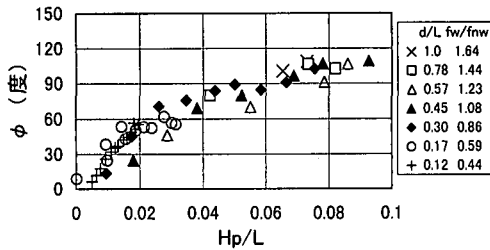


図-7 透過率とヨシ群落幅・波長比の関係

図-8 ヨシ変位量  $X_p$  と波形勾配の関係図-9 ヨシ変位と水位変位との位相差  $\phi$  と波形勾配の関係

顕著である。

### 3.3 現地ヨシ群の透過率および動揺変位量の推定

2に記した本工法により形成されたヨシ群落は、将来、植生マットの消滅はあるが、自身の成長に伴い安定した地盤を確保し成長を保持することが出来ると期待するのである。ヨシ群落が成長しその幅が  $B=1.5$  m 程になり、 $C$  値の算定に使用した波 ( $H/L=0.06$ ,  $d/L=0.17$ ) が作用すると仮定すると、図-6および7よりヨシ群落での透過率は  $0.65 < K_t < 0.9$  程度と推定される。図-8よりヨシの水平動揺変位量は静水面近傍で水深の20%程度と推定される。この変位量がヨシ群の成長と維持におよぼす生物学的な影響については不明であり今後の課題である。

## 4. おわりに

本研究で得られた主要な結果を以下に示す。

- $C$  値=約7の本湖浜においては、ヨシの自生による繁茂は困難である。
- 湖岸前面にヨシ群落の形成が見られなかった背後では、波の透過により明らかに湖岸の浸食および植生域の後退が進行していることが観察された。これに対し、

形成されたヨシ群落の背後では、様々な植物の侵入定着が確認された。このことから、安定した育成基盤に形成されたヨシ群落は、浸食性の本湖浜においても植生護岸として機能することが分かった。

c) 実際のヨシ苗群落の反射・透過率ならびに波方向振動変位量の、波形勾配および  $B/L$  ( $L$ : 波長,  $B$ : ヨシ苗群の岸沖方向幅) に対する変化特性を明らかにした。将来期待される本現場のヨシ群落幅に概ね対応する  $B/L=0.5$  の場合のヨシ群落の透過率は  $0.65 < K_t < 0.9$  であった。一方、ヨシ群の反射率は全般に低く0.1以下であった。

現時点では、植生ロールの導入によりヨシ群が形成されその背後の湖岸浸食も防止されている。しかし、経年変化により植生ロールが消滅した時点で、本ヨシ群落が自生できるかどうかは本工法の有する重要な課題である。今後、継続して植生の生育観察を行うと共に、ヨシ群落内外の水理量に関する現地観測も行う予定である。

謝辞：現地観測においては、長野県諏訪建設事務所長 谷部美雄氏より貴重な資料の提供を頂いた。実際のヨシ苗群を用いた室内実験およびデータ処理においては、本校学生の窪田裕亮君の熱心な協力を頂いた。ここに記し、厚く感謝の意を表する。

## 参考文献

- 宇多高明・小菅 晋・岡村和男・本田哲也・木内秀規 (1996): 湖岸堤への覆土工による湖岸の環境改善と覆土の安定性, 海岸工学論文集, Vol. 43, pp. 831-835.
- 沖野外郎夫 (1990): 生物相の変遷, アーバンクボタ, No. 36, pp. 20-41.
- 木村保夫 (1996): 大湖沼における水生植物群落の復元-諏訪湖の事例一, 人と湿地の生きものたちラムサールシンポジウム・新潟1996報告書, pp. 107-108.
- 西島照毅・宇多高明・中辻崇浩 (1998): 琵琶湖における湖岸植生の繁茂限界について, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 1126-1130.
- 林建二郎・萩原運弘・上原正一・藤間功司・重村利幸 (1998): 水辺植生の水理特性について, 海岸工学論文集, pp. 1121-1125.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右 (1974): 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 193-199.
- 堀川清司 (1991): [新編] 海岸工学, 東京大学出版会, pp. 60-62.
- Butler, E. E. (1991): Wave damping by reed, P. I. A. N. C. · A. I. P. C. N. - BULLETIN, No. 75, pp. 56-63.