

消波浮島による湖岸植生帯の復元に関する研究

RESTORATION OF LAKESHORE VEGETATION BY ARTIFICIAL FLOATING ISLAND

中村圭吾* 門倉伸行** 宗像義之*** 島谷幸宏* 宇多高明*

Keigo NAKAMURA*, Nobuyuki KADOKURA**, Yoshiyuki MUNAKATA***, Yukihiko SHIMATANI* and Takaaki UDA*

ABSTRACT: In Japan, lakeshore vegetation has been decreasing in many places. Lakeshore erosion due to wind waves is one of the main reasons. Recent study reveals critical wave condition for creation of the stable lakeshore. The artificial floating island (AFI) is a breakwater to control wave condition, which functions for production of vegetation habitat and improvement of water quality as well. AFI was experimentally installed at Shimanami Area in Lake Kasumigaura in 1998 in order to protect lakeshore and vegetation against waves. In this area lakeshore vegetation has been rapidly decreasing due to wave action. AFI is designed to attenuate significant wave height from 64 cm to 30 cm. As a result, lakeshore vegetation area has expanded 3.4% after 1-year period experiment. Annual wave energy behind AFI becomes half of that in the offshore. However, wave intrusion from lateral sides is significant in AFI and it causes lateral erosion of lakeshore. Installation of a breakwater made of riprap is recommended at lateral side in order to decrease wave reflection by covering the vertical seawall.

KEYWORDS: lakeshore, vegetation, restoration, wind waves, floating island, Lake Kasumigaura

1 はじめに

湖岸植生帯は、生物の生息場所の提供¹⁾だけでなく、水質浄化²⁾、湖岸の侵食防止³⁾⁴⁾、さらには自然景観や憩いの場の形成⁵⁾、環境教育の場となるなど実に多様な役割を果たしている。しかしながら、霞ヶ浦、諏訪湖をはじめ、日本の多くの湖沼では、水質汚濁や湖岸堤の建設などにより、湖岸植生帯が減少してきている⁶⁾。本研究の対象である霞ヶ浦(西浦)においてもヨシなどの抽水植物の繁茂面積が1972年～1982年で423haから293haへと約31%も減少している⁷⁾。湖岸植生帯の減少にともなって、鳥類、魚類、貝類などの生息場の減少、水質悪化に対する懸念が起こっており、湖岸植生帯の復元技術の開発が急務となっている。

湖岸植生帯減少の大きな要因の一つは、波浪による侵食である。最近の研究^{8)～14)}により湖岸植生の繁茂限界を与える波浪条件が明らかにされている。中村ら⁸⁾は、琵琶湖におけるヨシ原調査により、良好なヨシ原を形成するための必要条件を水深、湖岸の勾配、底質、入射波のエネルギーなどより求めている。また、宇多ら¹¹⁾は、湖岸植生の生育条件として波高、湖底勾配、その場所の粒径などが重要であるとし、それらをC値というパラメータで表すことにより、植生繁茂条件を明らかにした。これらのパラメータのうち、湖岸植生の繁茂条件には波高が最も重要な要素となる。宇多らは、波浪の代表値として、風向風速から算定した平均有義波をもとに、植生繁茂のための限界波高として、霞ヶ浦では約40cm、琵琶湖では約38cmという値を得ている。

一方、人工浮島は最近多用されている水環境技術で、生物生息空間の創造、水質浄化、景観の改善、消波などの効果を有する。これまで人工浮島の生物や水質に関する研究事例はいくつかあるが^{15)～18)}、消波機能を有する人工浮島(以下、消波浮島)に関する研究例はない。このことから、本論文では、植生帯を波浪から守ることを目的として設置された消波浮島の効果を明らかにするため、1998年～1999年に行った波浪・植生帯調査の結果を示すとともに、年間の波浪解析により消波浮島の効果を検証する。

* 建設省土木研究所 Public Works Research Institute, Ministry of Construction

** 熊谷組 Kumagagumi Co.

*** 国際航業株式会社 Kokusai Kogyo Co.

2 実験方法

2.1 実験場所

湖岸植生の復元を考える際、植生が部分的にしる現存する場所は、波浪や土壌条件から見て比較的安定した繁茂空間になっていることを考慮すれば、ある程度の植生帯が残されている場所を復元対象にするほうが望ましい。そこで、波浪による侵食が進行しているが、周辺にある程度の植生帯が残された場所で植生帯の復元を目指すこととした。この意味から選択された実験場所が霞ヶ浦（西浦）の左（東）岸約 6.2km 付近の麻生町島並地区である（図-1 参照）。実験場所では、1972 年撮影の空中写真によれば、沖合方向に幅 50m 程度

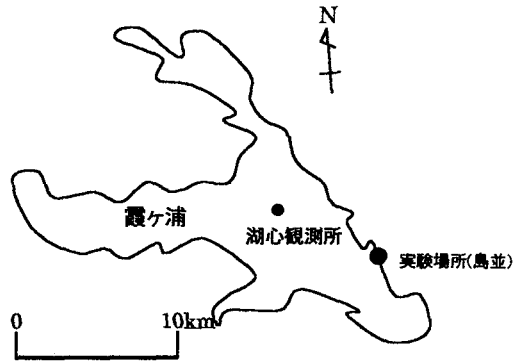


図-1 実験場所

の植生帯が沿岸帯方向に連続して分布していたが、1997 年になるとそれらは沖合方向に 10m 程度、湖岸方向に 60m 程度のパッチ状植生となった。実験場所の植生帯は、先端がえぐられたような断面形になっており、そのすぐ沖の水深は 1m 程度である。実験場所における植生帯減少の原因としては、護岸の建設による反射波の増大や、湖水位の上昇による波浪エネルギーの増大などが考えられる。また、実験場所は WNW（西北西）の吹送距離（風が水面上を吹きわたる距離）が 17.2km と長く、波浪が霞ヶ浦内で最も高い地点の一つでもある。このように来襲波のエネルギーが元々大きいことに加え、護岸建設や水位上昇などの人為的な波浪エネルギーの増大も加わって植生帯の消失が起きていると考えられる。

2.2 消波浮島の設計・構造

実験場所の代表波高（定義を以下に示す平均有義波高¹¹⁾）を求め、消波浮島によってこの代表波高を植生繁茂の限界波高¹¹⁾（霞ヶ浦では約 40cm）以下に消波するよう機能設計を行った。波高・周期は 1994～1996 年の 3 カ年の霞ヶ浦湖心風速データから日最大風速のみを用いて推算した。風速から波高・周期を求めるには、宇多ら¹⁹⁾の求めた式(1)、(2)を用いた。

$$gH_{1/3}/U^2 = 2.47 \times 10^{-3} (gF_e/U^2)^{0.427} \quad (1)$$

$$gT_{1/3}/2\pi U = 6.98 \times 10^{-2} (gF_e/U^2)^{0.285} \quad (2)$$

ここに、 $H_{1/3}$ ：有義波高(m)、 $T_{1/3}$ ：有義波周期(s)、 F_e ：有効吹送距離(m)、 U ：風速(m/s)、 g ：重力加速度(m/s²)である。

平均有義波高はここでは、以下の手順によって求めた。

- 1) 波向毎に式(1)より日最大風速に対して $H_{1/3}$ を求める。
- 2) $H_{1/3}$ を大きい順に並べ、上位 1/3 の平均値を求める。 $T_{1/3}$ も同様に算出する。
- 3) 各波向毎に平均値を求めた後、各波向毎の出現頻度を重みとして、平均有義波高、周期を計算する。

ここに、上位 1/3 の平均を求めたのは、植生帯の安定性が主に高波浪によって支配されていると考えたためである。また、ここでは計算の簡略化のために、 F_e については近似的に各方向別の吹送距離をそのまま用いた。また、波向は 16 方位より島並地区での波浪の発達に関係する 9 方向 (NNW, NW, WNW, W, WSW, SW, SSW, S, SSE) とした。計算の結果、島並地区の平均有義波高は $H=0.64$ m、周期 $T=3.4$ s、波向の主方向は $W8^\circ S$ (西から 8° 南より)

となった。ここでは、消波浮島により平均有義波高 64cm（入射波高）が植生繁茂限界波高である 40cm よりさらに低い 30cm（透過波高）となるように消波浮島を設計した。よって、設計消波率は、53%（ここで、消波率（%）=（入射波高－透過波高）/入射波高×100）となる。

消波計算は、消波浮島を摩擦型構造²⁰⁾の撓（たわみ）性浮防波堤として行った。このタイプの消波機構は主に波が構造物の内部を通り過ぎるときの摩擦によるエネルギー吸収を期待するものであり、透過波高比は power transmission theory²¹⁾によって計算され、入射波の波長および消波浮島の岸沖方向長さ、没水深、充填材の材料特性などによって決定される²¹⁾²²⁾²³⁾。

設置した消波浮島は、一つのユニットが、2.5m×2.5m であり、厚さは 0.50m である。

1つのユニットの断面を図-2に示す。材質はフレームが繊維強化プラスチック（FRP）で、側面、底面はジオグリッド（高強度プラスチック網）を FRP に融着したものである。内部の植生基盤および消波用充填材は柔らかい部材とし、比重が 1.15 のナイロン製の漁網を使用した。まずフレームと

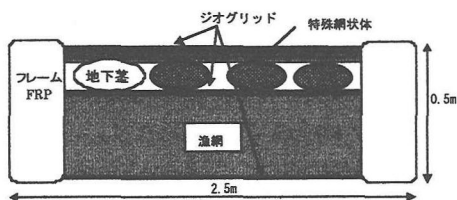


図-2 消波浮島断面図

一体となったジオグリッドの上に漁網を約 0.35m 積み上げ、その上にジオグリッドを敷き水生植物の地下茎を設置した。植生の押さえとして、その上にやや堅いナイロンポリエステルの特殊網状体を 5cm ほど設置し、空隙にはナイロン製の漁網を詰めた。さらに全体の押さえとしてジオグリッドで上から固定した。植生はヨシを植えた。地下茎は霞ヶ浦で採取し、施工直前に植栽した。

消波浮島は、沿岸方向に約 50m、沖合方向に約 10m の範囲に設置した。ユニットは沿岸方向に 10 基、沖合方向に 2 基設置した。ここでは北よりの風による侵食が大きいと想定されたので消波浮島は植生帯のやや北よりに設置した。また、消波浮島の沿岸方向の距離が約 50m なので、通例に従って設置位置はその半分の沿岸から約 25m とした。またユニット間隔は、2.5m とした。総面積は 125 m² である。霞ヶ浦は季節的にかかなり大きな潮水位変動が起こるため、係留方法には十分注意し、高強力テトロンロープにより中央部は 4 点で、また端部は 6 点で係留した。消波浮島の向きは、波向の主方向と直角になるように設置した（図-3 参照）。消波浮島の島並地区への設置は、1998 年 3 月に行った。

2.3 調査方法

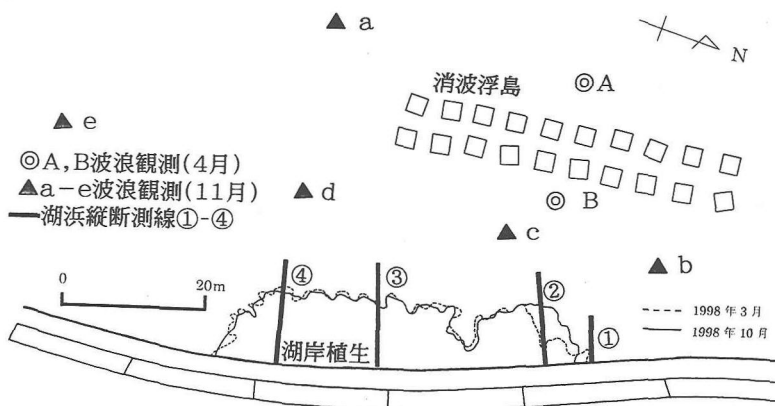


図-3 調査地点位置図

(1) 波浪調査

消波効果の確認、および波浪推算の精度を検証するために波浪の現地実測を行った。波浪観測は、1998年4月14日に2回(風向SSW)、11月9日に2回(風向SW)実施した。図-3に示すように、4月は地点A、Bで、11月は地点a～eで行った。観測には、コンクリート製の土台にステンレス製のポールを差し込み、それに固定した測量用スタッフを用いた。またスタッフに沿って釣り糸を張り、そこに軽量で波の上下動に良好に反応する浮きを取り付けてビデオ撮影した。フロートのビデオ撮影は1回当たり10分間行った。撮影結果は室内でコマごとに再生して各回100波について波高、周期を測定し、有義波高・周期($H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$)を算定した。有義波高は1/3最大波とも言い、波高を最も大きいものから順番に、全体の個数の1/3にあたる波を取りだし、それらの波高を算術平均したものである。1/10にあたる波を取り出した場合は1/10最大波という。なお、波向は現地で目視により測定した。

(2) 湖岸植生帯調査

消波浮島の植生帯復元効果を把握するために植生調査を行った。図-3に示す湖岸植生帯および群落分布について、ラジコンヘリより撮影した空中写真を判読した。さらに現地踏査により湖岸植生の種類・繁茂域について詳細調査を行った。また、水中部の侵食状況を確認するために湖岸植生の縦断形測量を図-3に示す4測線で行った。湖岸植生帯調査は浮島設置前の1998年3月、設置後の同年10月、1999年3月にそれぞれ実施した。

3 調査結果

3.1 波浪調査

波浪観測によれば、消波浮島の消波性能は風向によって大きく異なることが分かった。図-4、5はそれぞれ1998年4月と11月の調査結果を示している。横軸には H_{max} (最大波)、 $H_{1/10}$ (1/10最大波)、 $H_{1/3}$ (1/3最大波)を取り、縦軸が波高値および消波率を示している。入射波にあたるのが、地点Aと地点eであり、地点Bと地点cは消波浮島背後の地点(透過波)である。4月の調査(図-4)では、風向が南南西(SSW)であり、ほぼ南北方向に設置された消波浮島に対し、平行に近い方向(SSW)から吹く風であったために、消波率は約5%であった。また、最大波においては消波率が負の値となっているが、これは反射波の影響と考えられる。一方、風向が南西(SW)であった11月9日の調査(図-5)では、消波率が約40%であった。風向がやや南寄りであり、反射波等の影響も考えると設計消波率である53%に近い消波効果を有することが確認できる。

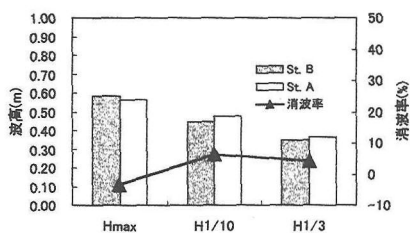


図-4 消波効果(4月)

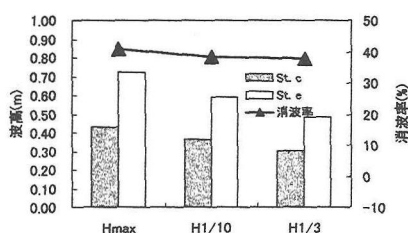


図-5 消波効果(11月)

3.2 湖岸植生帯調査

調査地点では湖岸から沖に幅約15mの植生帯が見られ、そのうち沖側5mほどが水中にある。また湖岸に沿った長さは約60mである。植生はヨシ(*Phragmites australis*)が優占しており、岸側にササ類、ヤナギ類が生育し、セイタカアワダチソウ、タネツケバナ、スイバなどが見られる。図-6に1998年3月と10月、1998年10月と1999年3月の湖岸植生帯の面積変化を示す。設置前の1998年3月が417㎡、同年10月が425㎡、99年3月が431㎡と1年間で3.4%ほどの植生帯の増加が見られ、消波浮島の効果が確認される。

また、3月から10月の間、湖岸植生帯の南側では植生帯が減少したのに対し、北側では

増加した。逆に10月から3月は湖岸植生帯の北側が減少し、南側が増加している状況が確認された。夏季、南側で植生帯が狭くなるのは、南寄りの風が吹いて浮島の南側が強い波浪を受けることに起因すると推察される。冬はこれと逆である。大きな変化としては植生帯の北側で1998年3月から10月の間に30 m²ほどの増加が見られた。この地点は消波浮島のほぼ中央の背後であり、もともと過去に植生帯が存在していたため回復が早かったと考えられる。一方、植生帯の北側では直立護岸に沿って発生する沿い波により常に侵食が進行した。

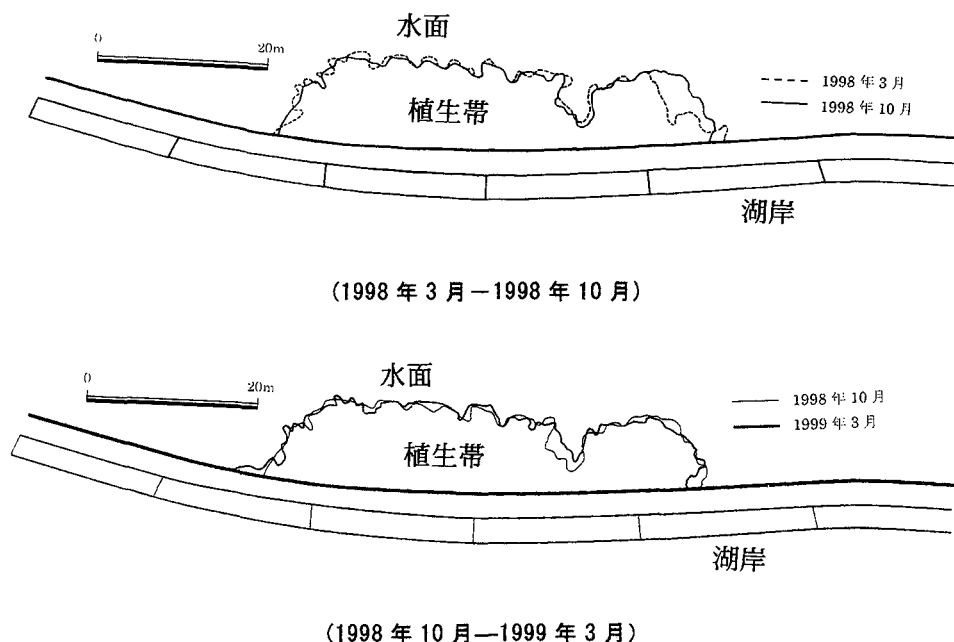


図-6 湖岸植生帯の面積変化

図-7に縦断測線①、②を示す。縦軸は、水面からの地盤高さ、横軸は護岸から沖方向への距離を表す。縦断測線①では、1998年3月には沿岸砂州が存在したが、10月には平坦になり、さらに1999年3月にはほぼ水深1m程度まで侵食されている。この地点の平均有義波高は64cmであるので、漂砂の移動限界はほぼその1.7倍¹⁾となり、1m程度である。したがって、縦断測線①では、侵食の結果ほぼ安定状態になったと考えられる。縦断測線②では、1998年3月から10月の間にやや堆積傾向が見られたが、冬季の強い北からの波浪によって、10月から1999年3月の間に侵食がかなり進行した。縦断測線③④では大きな変化は観測され

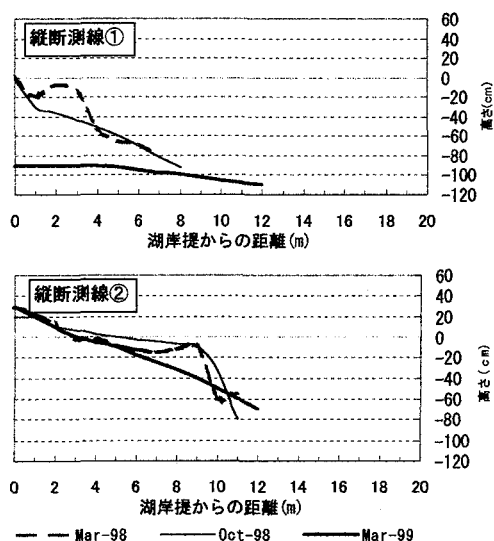


図-7 湖浜縦断形の変化

なかった。

4 消波浮島の波浪解析

4.1 波浪推算

(1) 波浪推算精度の検証

風速データを利用して1年間の波浪エネルギーを算定するためには、まず風速及び吹送距離から算定される波浪と、実測波浪とがほぼ同等であることを検証する必要がある。そこで現地波浪観測時の湖心風速データ（前後10分平均）を用いて波浪推算を行い、実測波浪（10分間観測）と比較することにより波浪推算の精度を検証した。波浪推算には式（1）、式（2）を使用した。推算波高・周期と実測波高・周期の比較を表-1に示す。その結果、推算波高・周期は実測波高・周期と概ね一致しており、風速データからの波浪推算の精度はかなり高いことが分かる。

(2) 調査水域の波浪特性

式（1）、（2）により波浪推算が可能であることを確認したので湖心の毎時風速データ（1996、1997年）をもとに、調査水域の植生帯が受けている波浪を推算した。推算に用いた風向別の吹送距離を表-2に、波高、周期の出現頻度を図-8に示す。実験場所では、年間のうち、60%弱は波浪が発生しない陸側からの風または静穏（風速0.2m/s未満）の期間となっており、波高の最大値は1.1~1.2m、周期の最大値は4~5sである。出現頻度が高いのは、SSE、SW、W、NNWである。波高は70%強が0.2m以下で、周期は1~2sが最も多く、2s以下の波が70%前後となっている。

表-1 推算波高・周期と実測波高・周期の比較

1998年4月14日

時刻	風向	吹送距離 (m)	風速 (m/s)	推算波高 (m)	推算周期 (sec)	実測波高 (m)	実測周期 (sec)
13:00	SSW	4,100	11.4	0.38	2.61	0.42	2.80
15:00	SSW	4,100	9.1	0.29	2.37	0.31	2.40

1998年11月9日

時刻	風向	吹送距離 (m)	風速 (m/s)	推算波高 (m)	推算周期 (sec)	実測波高 (m)	実測周期 (sec)
13:00	SW	3,500	14.5	0.47	2.77	0.56	2.46
14:00	SW	3,500	11.9	0.37	2.54	0.37	2.20

表-2 吹送距離

風向	吹送距離 (m)
NNW	1,400
NW	11,400
WNW	17,200
W	8,900
WSW	4,500
SW	3,500
SSW	4,100
S	4,700
SSE	800

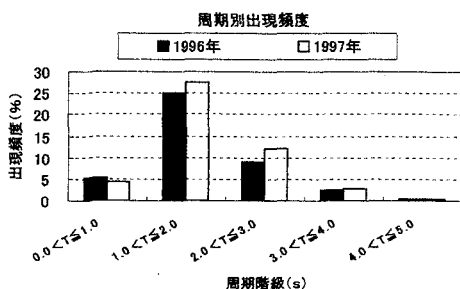
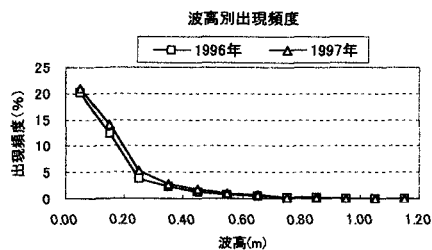


図-8 調査水域の波浪特性

4.2 消波浮島の消波効果

(1) 回折・反射波を除いた透過波高の算定

消波浮島は、沿岸方向の長さが短く透過性の構造となっており、湖岸の状況もヨシ帯以外は直立護岸であるため、波の透過、回折、反射が生じている。一般に浮島背後の実測波高 H_g は回折・反射・透過波高との間に式(3)の関係がある。したがって回折波高と反射波高を計算により明かし、実測波高からこれらの影響を除くことで、透過波高を算定することができる。

$$H_g = (H_d^2 + H_t^2 + H_r^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで、 H_g ：浮島背後の波高、 H_d ：回折波高、 H_t ：透過波高、 H_r ：反射波高

回折波の計算は Helmholtz の方程式を基本とした Sommerfeld の近似解を用いて行い²⁴⁾、反射波は、護岸法線を仮想の開口部とした回折計算により求めた²⁴⁾²⁵⁾。計算格子を図-9に示す。計算では11月9日の調査(波向 SW、周期 2.5 秒)に対して回折・反射波を計算した。また、反射計算における護岸の反射率(反射波高/入射波高)は既存資料²⁵⁾より、0.9と0.7、湖岸植生帯の反射率を0.1と0.05として試算した。

実測波高と計算波高を比較したものを図-10に示す。波高はいずれも沖波を1.0とした時の波高比である。波向が SW のとき波浪測定地点 d, e(図-3 参照)は消波浮島によって直接遮蔽されていないので回折・反射のみの波高と考え、実測と比較した。図-10より、反射率を0.7とするとほぼ実測値に近づくことが分かる。通常、直立護岸の反射率は0.9とすることが多いが、実験場所は高波浪時に護岸で越波が発生するためエネルギー損失が生じ、やや小さな反射率になっているものと考えられる。湖岸植生帯の反射率は0.1、0.05のいずれでも計算結果には影響しなかった。また、消波浮島背後(B, C)の実測波高から、計算により求められた回折波と反射波の影響を取り除いた透過波高比は、0.39~0.64の間にあり、平均0.50である(護岸の反射率0.7のとき)。

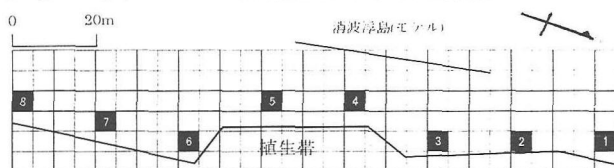


図-9 計算格子

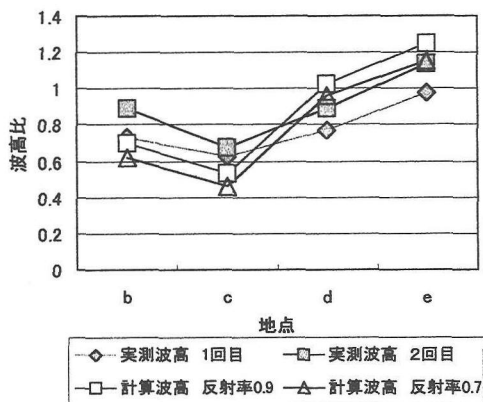


図-10 実測波高、計算波高の比較

(2) 消波浮島による周辺湖岸の波浪エネルギー変化

これまでの結果をもとに、消波浮島により周辺湖岸が1年間に受けるエネルギーの変化量を試算した。波浪エネルギーの計算は式(4)を使用した。

$$E = \frac{1}{16} \rho g H^2 N \quad (4)$$

ここに、 E ：波浪エネルギー(t/s)、 ρ ：水の密度(1.0t/m³)、 g ：重力加速度(9.8m/s²)、 H ：波高(m)、 N ：

波高別出現頻度 (N=n×3, 600s : n は出現頻度)

計算ケースは反射条件 3 ケース (表-3) × 9 波向 (SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW) × 4 周期 (代表周期 1, 2, 3, 4 s) の 108 ケースである。波高は式 (1)、式 (2) をもとに求めた波向別・周期別の代表波高を用いた。反射条件のケース 3 は現状の反射波を低減すべく周辺護岸の捨石被覆などを想定した時である。

消波浮島周辺の波浪エネルギーの状態を把握するため、図-9 に示す 8 地点において、波浪エネルギーの計算を行った。ここで、透過波は消波浮島によって直接遮蔽される地点において考慮し、透過波高比は (1) の計算よりすべて 0.5 とした。

周期 1s 毎の沖波波浪エネルギーの計算結果を表-4 に示す。沖波波浪エネルギーは周期が 3, 4s の波が全体の約 7 割弱を占めていることがわかる。また、S、W、WNW 方向のエネルギーが大きく、9 方向のうちこの 3 方向で約 6 割のエネルギーを占めている。図-11 に、1 年を台風などが多い 4 月から 9 月と、冬季の季節風が強い 10 月から 3 月に分けて計算した沖波の方向別エネルギー分布を示す。4 月から 9 月が南寄りのエネルギーに集中し、10 月から 3 月は逆に北寄りに集中しており、2 つの時期の風向が大きく異なることが読み取れる。このことは、図-6 に示した植生面積の変化傾向と一致している。また、通年のエネルギー量としては、北寄りのエネルギーが大きく実験場所の沿岸漂砂の移動方向が北から南であることが分かる。

地点別の総波浪エネルギーを図-12 に示す。現状では、地点 1、7、8 においては、反射波により、沖波 ($521 \times 10^6 \text{kg/s/m}$) よりもエネルギーが 10%~20%ほど大きくなっている。また、消波浮島背後の地点 4 は、総波浪エネルギーがケース 2 において $272 \times 10^6 \text{kg/s/m}$ と沖波の約半分のエネルギーとなっている。また、護岸の反射率を 0.4 とした場合、総波浪エネルギーは消波浮島の遮蔽域の地点 3、4、5 で最大 10%程度、非遮蔽領域の地点 1、2、6、7 で最大 20%程度減少する。

表-3 反射率の設定ケース

ケース	護岸	植生帯
1	0.7	0.1
2	0.7	0.05
3	0.4	0.05

表-4 沖波の波浪エネルギー計算結果

単位: $10^6 \text{kg/sec} \cdot \text{m}$

代表周期 (s)	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	計
1	3025	5121	252	313	230	116	81	90	2048	11275
2	4047	58074	13264	24735	11298	10637	4223	9632	18267	154175
3	0	31750	44700	32471	7262	53570	33160	24338	0	227251
4	0	0	0	0	0	25853	92727	9825	0	128205
計	7072	94945	58215	57518	18788	90177	130191	43685	20315	520905

10~3月: 沖波

4~9月: 沖波

全年: 沖波

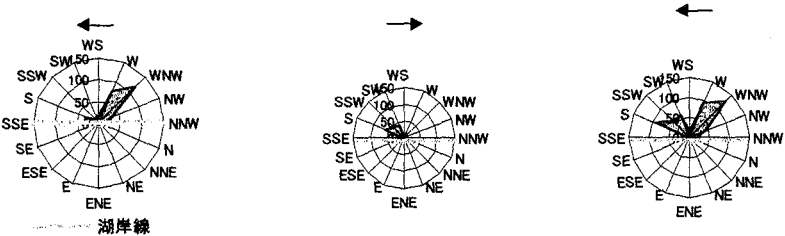


図-11 沖波エネルギーの季節変化

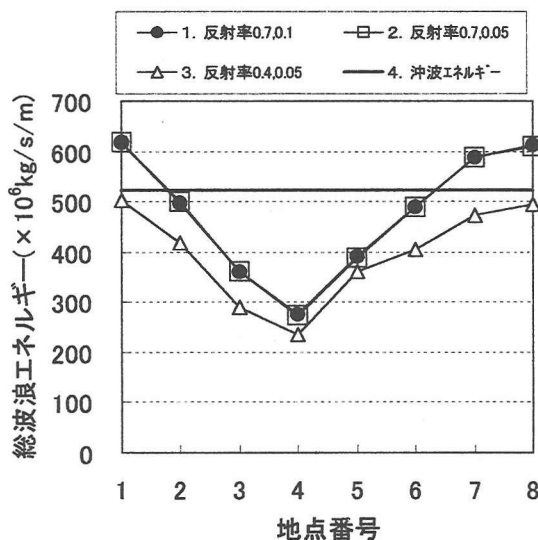


図-12 総波浪エネルギーの地点別変化

5 まとめ

霞ヶ浦では波浪侵食による湖岸植生帯の減少が問題となっている。そこで本研究では、人工浮島技術を応用した消波構造物（消波浮島）による湖岸植生帯の復元を試みた。ここでは、その消波効果および植生帯復元の効果を検証した。また、数値計算により消波浮島が植生帯の受ける年間波浪エネルギーに与える影響および護岸の反射波の影響を検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ① 消波率 53%と設計された消波浮島は、消波率が観測で約 40%、さらに反射・回折波の影響を取り除くと約 50%となり、消波構造物として機能を満たすことが分かった。
- ② 湖岸植生帯は消波浮島の背後において 1 年間で面積の約 3.4%が復元した。しかしながら護岸に沿って発生する沿い波によって植生帯北側の侵食は進行した。
- ③ 消波浮島の背後では、消波効果により年間波浪エネルギーが沖波の約 50%に削減された。
- ④ 護岸の反射波により、湖岸帯の年間波浪エネルギーは沖波に比べ 10~20%増加する。したがって護岸の反射率を下げるのが重要である。

謝辞

本研究は国立機関公害防止等試験研究費の一環として実施している「浮島による湖沼の自然回復と水質浄化に関する研究」、および建設省土木研究所、(財)土木研究センターおよび民間企業 11 社による共同研究「糸状生物担体を用いた河川・湖沼の浄化技術の開発」の一部として行った。共同研究の方々および研究を遂行するにあたり、多大なる協力をいただいた建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所の水質保全課の方々に、深甚なる謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木紀雄, 桜井善雄, 沖野外輝夫: 雑録 水辺環境の保全とその意義 一環境保全の理念と観点から一, 日本生態学会誌, Vol. 39, No. 1, pp.81-89, 1989.
- 2) (社)日本水産資源保護協会: 平成 6 年度 赤潮対策技術開発試験報告書, 140p., 1994.
- 3) Bouter, E. E.: Wave Damping by Reed, An Investigation in environmentally friendly bank protection, P. I. A. N. C. - A. I. P. C. N-Bulletin 1991- No. 75, pp.56-63, 1991.
- 4) 宇多高明, 吉田隆昌, 西脇照毅, 富士川洋一: 植生を利用した湖浜保全に関する一考察 一琵琶湖を例として一, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.1111-1115, 1994.
- 5) 桜井善雄: 植生と湖岸景観 一アンケート調査の結果から, 水草研会報 No. 29, pp.12-18, 1987.
- 6) 平井幸弘: 湖の環境学, 古今書院, 186p., 1995.

- 7) Sakurai, Y. : Decrease in Vegetation Area, Standing Biomass and Species Diversity of Aquatic Macrophytes in Lake Kasumigaura (Nishiura) in Recent Years, Jpn. J. Limol., 51, pp.45-48, 1990.
- 8) 中村充 : 水産土木学 生態系海洋環境エンジニアリング 第6章, pp.519-534, 1991.
- 9) 宇多高明 : 第4章 湖沼における風波による浸食, 日本の海岸浸食, 山海堂, pp.371-398, 1997.
- 10) 宇多高明, 小菅晋, 岡本正一, 伊藤正光 : 風浪の作用下での湖岸への植生の繁茂条件について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1116-1120, 1997.
- 11) 宇多高明, 西島照毅 : 水辺環境の保全と地形学, 第5章 風波の作用下における湖岸植生の繁茂限界と湖内の漂砂, 古今書院, pp.112-147, 1998.
- 12) 西島照毅, 宇多高明, 中辻崇宏 : 湖岸植物の繁茂限界波高の算定—琵琶湖東岸を例として—, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1111-1115, 1997.
- 13) Coops, H., Geilen, N., Verheij, H. J., Boeters, R. and Velde, G. V. : Interactions between waves, bank erosion and emergent vegetation: an experimental study in a wave, Aquatic botany, 53, pp.187-198, 1996.
- 14) Ostendorp, W. : Estimation of mechanical resistance of lakeside Phragmites stands, Aquatic Botany, 51, pp.87-101, 1995.
- 15) Nakamura, K., Shimatani, Y. et al. : The ecosystem of an artificial vegetated island, Ukishima, in Lake Kasumigaura, Proc Vol.1 6th Int. Con. of Lakes-Kasumigaura'95, pp.406-409, 1995.
- 16) Nakamura, K., Tsukidate, M. and Y. Shimatani : Characteristic of ecosystem of an artificial vegetated floating island, Ecosystems and Sustainable Development, pp.171-181, 1996.
- 17) 中村圭吾, 保持尚志, 島谷幸宏 : 人工浮島(霞ヶ浦 土浦港)の効果とその生態系, 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, pp.155-159, 1995.
- 18) 百瀬浩, 舟久保敏, 木部直美, 中村圭吾, 藤原宣夫, 田中隆 : 水鳥類による各種植栽浮島の利用状況, 環境システム研究, Vol. 26, pp.45-53, 1998.
- 19) 宇多高明・赤穂俊作・今井武雄 : 霞ヶ浦における風波による湖浜変形の実体, 土木学会論文集, No.381/II 7, pp.161-170, 1987.
- 20) 樺木享 : 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, p.236, 1991.
- 21) Wiegel, R. L. : Oceanographical Engineering, Prentice-hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., pp.128-149, 1964.
- 22) 加藤重一, 乃万俊文, 萩野静也 : 機性浮き消波工の消波効果 一増養殖漁場外郭施設用消波工について(Ⅲ), 農土試験 10号, pp.239-251, 1972.
- 23) 中山嘉文 : 機性浮消波堤の開発について, 浮防波堤—現状と課題—, (社)国際海洋科学技術協会, pp.38-43, 1987.
- 24) 高山知司 : 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技研資料, No.367, 140p., 1981.
- 25) 合田良實 : 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp.68-72, 1990.