

湖岸植生の繁茂環境に対する 来襲波の影響

浅野敏之*・原口征士**・田中雄一***

INFLUENCE OF INCIDENT WAVE ACTION ON GROWING ENVIRONMENT FOR LAKE-SHORE VEGETATION

Toshiyuki ASANO, Seishi HARAGUCHI, Yuichi TANAKA

Recently, environmental value of lake-shore vegetation attracts attention among researchers and practitioners. Several attempts to restore vegetated wetlands have been conducted. However, the restoration was sometimes failed due to lack of engineering knowledge. This paper investigates the relationship between the growth of vegetation and incoming wave strength taking Lake-Shinji and Lake-Jinzai in Shimane prefecture as the research fields. The wind wave climate as well as the growing power of the vegetation are regarded to vary seasonally. These seasonal effects on the relation are also discussed.

Keywords : vegetation, wave action, lake-shore restoration, seasonal change

1. はじめに

近年の環境問題への関心の高まりから、湖岸の植生群落が有する水質浄化、生物の棲息場の提供、自然景観の形成といった多様な価値に注目が集まっている。沿岸植生群落は波を減衰させ、底泥を堆積させるので、この水理機能を利用すれば護岸などの人工構造物を用いなくとも背後地の保全に役立たせることができる。このような抽水植物群落を利用した自然な形の湖岸の保全工法は、琵琶湖¹⁾、諏訪湖²⁾などで試みられている。また、人工の浮体の上に水生植物を植栽した人工浮島も生物棲息空間の創造や景観改善とともに背後地の湖岸植生の保全に有効であり、霞ヶ浦で試験適用がなされている³⁾。

一方で、湖岸植生は波浪による流体力が大きい場所、底質移動が顕著な場所では生育できない。した

がって、湖岸に抽水植物群落を復元するためには、生態学的な知見のみならず、波浪や土砂移動などの物理環境条件を考慮し、植生繁茂の適地であることを調査しておく必要がある。さらに植生は生物体であるがために、気温、水温、風、波浪などの環境条件の変動とともに水理機能が変動することも見落とせない重要な性質である。河川内の水辺林や河畔植生は、洪水による倒伏を受ける一方で、植生の流体抵抗によって河道の流下能力や河道断面特性に影響を与えている。こうした河川と植生群落の相互作用は、夏期・冬季の植生繁茂状況の影響を受けて季節変動するものと考えられる。楠田⁴⁾は、「環境に関わる水理学の研究展望」で、植生の生育条件と関連づけた植生と流れとの相互作用の解明を将来の検討課題の1つに挙げている。Morrisら⁵⁾は湖畔植生の密度や多様性と、外力としての湖面の貯水位や波の作用との関係を調べており、この結果から河岸の稀少植生の長期的な保全管理について議論している。Keddy⁶⁾は、カナダ・オンタリオ州の Axe Lake において、季節変動する風波の特性と湖岸の植生繁茂状況や群落場の底質特性との関係を調査し

2004年8月31日受理

* 海洋土木工学科

** 博士前期課程海洋土木工学専攻

*** 国際航業(前 海洋土木工学科学生)

ている。

本研究は、上述の環境水理学的な視点に立って、湖岸植生の繁茂と来襲波浪との関係とその季節変動を含めて考察したものである。本研究では、湖岸の人工化が著しいためにヨシの苗を移植して再自然化を進めている宍道湖と、同様な自然・気象条件であるが、自然湖岸が多く残されている神西湖を調査地点として取り上げ、来襲波浪と植生の繁茂状況との関係を調べた。

2. 宍道湖における調査・検討

2.1 宍道湖の現況

宍道湖はシジミやコノシロ・ワカサギなど漁業資源に恵まれた汽水湖である(図-1)。面積79.2km²、湖岸延長約45kmを持ち、水深は平均4.5mで最深部でも6m程度と浅い。古くから湖岸の改変がなされたため、湖岸総延長に占める人工湖岸の比率は74.2%となっている。これは琵琶湖(32.0%)、霞ヶ浦(54.0%)と比べても高い数値である。湖岸の人工化のために植生湖岸は減少しており、ヨシを卓越種とする延長3.1km(平成8年度時点)の植生湖岸は、斐伊川河口部に位置する西岸と南岸部分に位置している(図-2)。ヨシ群落はヤマトシジミの稚貝の生息地として重要な役割を果たしており⁷⁾、水質保全や景観保全の面でもその貢献は大きい。現在、湖沼環境改善に向けての取り組みの一環として、湖岸に沿った水際部に竹や間伐材を用いた基盤構造体を作り、その中にヨシのポット苗を移植する湖岸再自然化プロジェクトが進行している(写真1)。

宍道湖の底質は、東岸の大橋川河口付近や西岸の斐伊川河口付近では97%以上が粒径0.063mm以下のシルト分であり、南岸と北岸で粒径0.1~0.2mmの細砂が卓越する⁸⁾。

2.2 来襲波浪の推算

松江市における1988年~1997年の10年間の月平均風速・風向をアメダスデータから抽出した。10年間の平均月別風向、月別平均風速を図-3に示す。図からわかるように冬季の卓越風向は西であり、風速も冬季が大きい。8月から10月にかけて風向は東に偏るが風速は減少する。卓越風向に対応する宍道湖の最大吹送距離を読みとり、浅海域の有義波を推算する方法として現在も広く用いられているBretschneider-井島法⁹⁾で波浪推算を行った。図-4に西風の場合に図-2のNo.25地点で推算された有義波高を示す。推算有義波高 $H_{1/3}$ は最大でも約20cm程度であり、また推算有義波周期 $T_{1/3}$ は1.4秒~1.7秒となった。

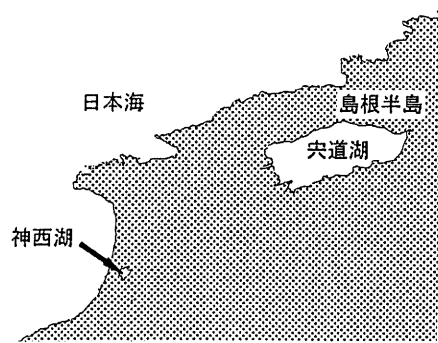


図-1 宍道湖と神西湖の位置

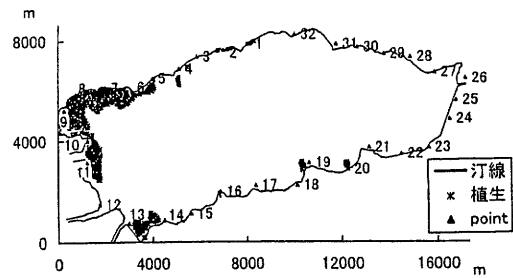


図-2 宍道湖における植生の繁茂状況



写真-1 宍道湖に設置されたヨシ苗

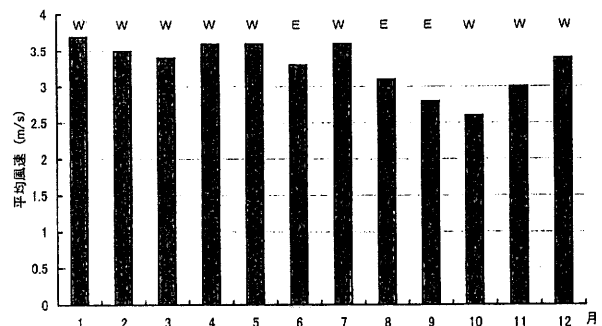


図-3 松江市における月別平均風速
(棒グラフの上の記号は卓越風向)

2.3 湖岸への来襲波浪の特性

海岸侵食が問題となるような外洋に面した海岸と

比較すれば宍道湖上に発生する風浪は小さく、そのために水深測量データも密な間隔では測定されていない。入手できる宍道湖の水深データは市販されている1万分の1湖沼図だけであった。この湖沼図から125m格子で水深を読みとり、湖岸各点に來襲する波高分布の計算に用いる。

宍道湖は盆状の湖底地形を有しており、そこで発生する風波は浅水変形をほとんど受けることなく湖岸に來襲する。また、前節で述べたように推算された波は有義波高 $H_{1/3}$ で高々20cm、有義波周期が $T_{1/3}=1.7s$ (深海波長 $L_0=2.34m$) である。こうした來襲波条件と地形条件から、波浪変形計算については有限振幅性や碎波変形を考慮する必要はないと判断できるので、本解析では屈折と浅水変形を計算対象として湖岸に來襲する波高分布を求めた。波の屈折計算は、波向き線間隔方程式¹⁰⁾に基づいて行った。

2.4 來襲波浪とヨシの繁茂状況との関係

冬季、夏期それぞれについて、湖岸上の各点に來襲する波の波高分布を求め、植生の繁茂状況と比較した。沖波の周期を1.7sとし、西風(冬季)については沖側端を $x=9000m$ として湖岸西側への波向き線を計算した(図-5)。東風(夏期にはほぼ対応)については $x=6000m$ を沖側端として、湖岸東側への波向き線を計算した(図-6)。

西風の場合の波向き線図である図-5と植生繁茂域を示す図-2を比較すると、図-2の点19~20などが湖岸に遮蔽される領域となり、植生の繁茂域と対応している。また、西風では湖の西岸は風上側となって、波向き線を描くまでもなく波浪が來襲しない領域となり、植生繁茂域である図-2の点1~3、点5~11、点13~14と重なることがわかる。一方、東風の場合の図-6では、こうした西岸の繁茂域に波が來襲するが、それでも植生繁茂域である点5~7、点13~14の付近は波向き線が広がっており、波浪が比較的穏やかな領域となることがわかる。

領域内の任意の計算点の屈折係数は、波向き線間隔の逆数の平方根として求められる。各波向き線を追跡し、浅海域になった地点から浅水係数を求め、湖岸各点に來襲する波の波高を計算した。

図-7および図-8にそれぞれ、西風(冬季)、東風(夏)による湖岸に沿った波高分布を示す。西風時の結果である図-7から、地点番号No.1~15は風上側で、波が打ち寄せない側となるが、図-2よりその範囲には植生が繁茂する(図-7中にVegetationと記した横線の範囲)ことがわかる。また、No.18~20は風下側になるが、波向き線からこの領域は湖岸の遮蔽領域となっており波高は小さい。この静穏域も植生の繁茂域となっている。一方、図-8は東風の結果であり、植生が繁茂する側が風下側となって波浪

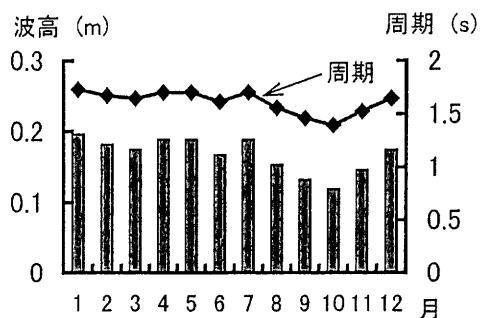


図-4 推算有義波高と推算有義波周期

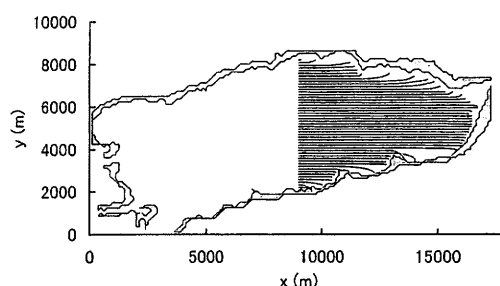


図-5 西風の場合の波向き線

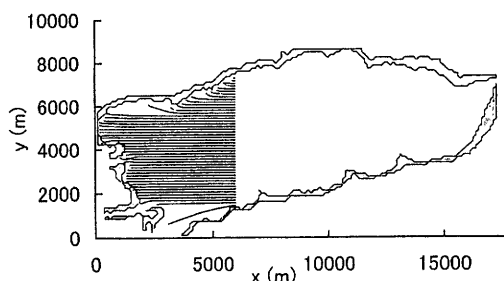


図-6 東風の場合の波向き線

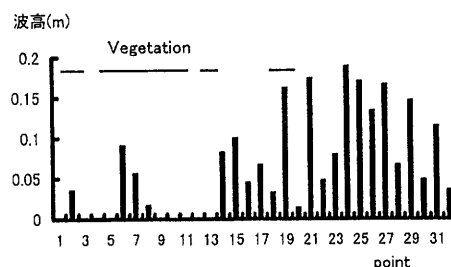


図-7 西風の場合の波高分布

が來襲する側と一致するが、東向きとした6,8,9月も風向きは北東などに変動しており、またその期間も3ヶ月程度と短かく、風波の波高も大きくない。

3. 神西湖における調査・検討

3.1 神西湖の現況

神西湖は島根半島の最西に位置する、面積 1.35km²、平均水深 1.5m、平均塩分濃度 1.50%の汽水湖である(図-9)。湖岸は北東部など一部を除いて自然湖岸のまま残され、全体で約 6ha のヨシ湿地が繁茂している。神西湖の深浅測量は、平成 13 年 9 月に島根県出雲土木建築事務所によって行われている。この水深データは 100m 正方格子で約 120 点の測点があり、これに基づいて等深線コンターが描かれている。このコンターを 50m 格子で読みとると同時に、kriging 内挿により 12.5m 格子間隔の水深データに直し、後述する屈折計算に用いた。神西湖の横断面は宍道湖と同様、盆状の凹型地形となっている。

秋葉・細見¹¹⁾は、図-9 に示す St.A~D の 4 箇所の調査地点において、繁茂するヨシの現存量の季節変動を調査し、単位面積当たりの乾燥後重量(g dry weight)の形で整理した(図-10)。どの調査地点でも共通して見られる結果として、4 月~5 月にヨシの現存量はほぼ最小値となること、6 月のヨシの出芽時期とともに現存量は増加を始めること、8 月から 10 月にかけて最大値を示すとともに、ヨシの穂が出尽くして枯れていく 10 月以降に現存量が減少すること、などが認められる。秋葉・細見はヨシ湿地を維持していくための環境条件を検討するために、各調査地点の塩分濃度、栄養塩濃度、底質土壌の含水比、強熱減量および平均粒径などを測定している。秋葉らによれば、こうした環境因子は湖岸の各調査地点で大きく異なったが、ヨシ現存量とは有意な関係が認められなかったとしている。しかし、土壌間隙水の塩分濃度とヨシの現存量とは負の相関が、また土壌間隙水のアンモニア態窒素(NH₄-N)濃度とは正の相関が若干認められると報告している。底質土壌の粒径特性については、St.A と St.D は神西湖に流入する河川の河口部に近いため粒径が 100 μm

程度の泥質であり、一方、St.B, St.C は平均粒径 200 ~420 μm の砂泥質となっている。

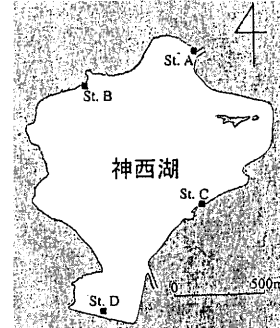


図-9 神西湖

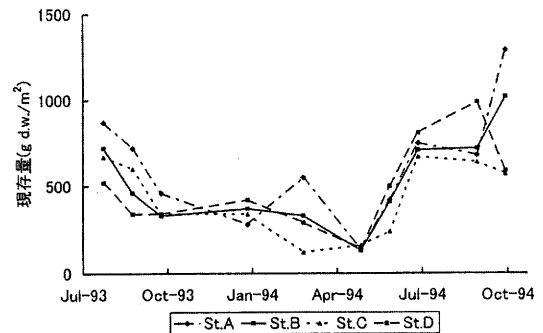


図-10 ヨシの乾燥重量の季節変化¹¹⁾

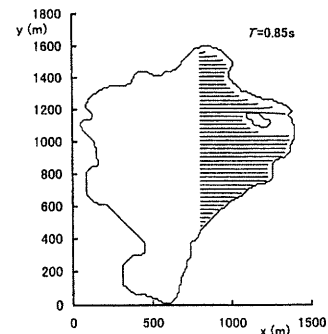


図-11 西風の場合の波向き線

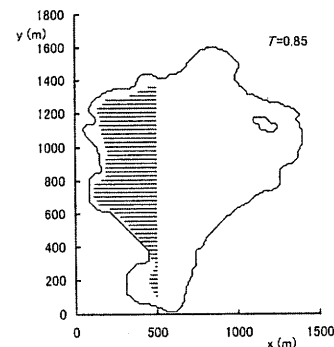


図-12 東風の場合の波向き線

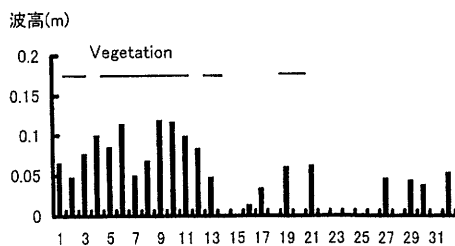


図-8 東風の場合の波高分布

3.2 湖岸に到達する波の波浪推算

風波の推算には、出雲市における 1988 年から 1997 年の月平均風速・風向をアメダスデータから読みとった。その結果は図-3 に示した松江市の結果とほぼ同じである。

湖岸上の各点に来襲する波の波高分布を前述の Bredschneider-井島法によって推算した。風向きに沿って吹送距離を求め、その区間の平均水深を与えて有義波高と有義波周期を計算した。

神西湖は東西方向の吹送距離は最大で約 1200m、南北方向でも 1600m と短く、日平均風速を用いた場合の発生する風波の平均有義波高は 2~3 cm となる。後述する 1993 年 7 月から 1994 年 10 月までの出雲市における日別の風向・風速観測データを用いて、図-9 の St.C における波浪推算を行った場合でも、日平均風速に対する推算有義波は $H_{1/3}=11.8\text{cm}$ (この時有効波周期 $T_{1/3}=0.94\text{s}$) が最大であった。この日の日最大風速で計算しても $H_{1/3}=15.4\text{cm}$ ($T_{1/3}=1.12\text{s}$) となった。このような高波浪の場合でも、湖岸近傍を除き深海波の条件を満たすことがわかった。

こうして得られた推算波を沖波として、湖岸に来襲する波高分布を求める。西風(冬季)、東風(夏期)にはほぼ対応)のそれぞれについて波向き線間隔方程式に基づく屈折計算を行った(図-11、図-12)。推算沖波の周期は $T=0.85\text{s}$ であり、ほとんどの領域で深海波となって波向き線はほぼ直線となった。わずかに波向き線が広がっていく区間が認められ、湖内の小島や湖岸に遮蔽される領域が存在する。

3.3 ヨシの繁茂密度と湖岸に来襲する波高との関係

図-10 に示した秋葉・細見のヨシ現存量の季節変化のデータと、湖岸に来襲する波浪との関係を調べた。秋葉・細見の調査を行った期間である 1993 年 7 月から 1994 年 10 月までの出雲市における日別の風

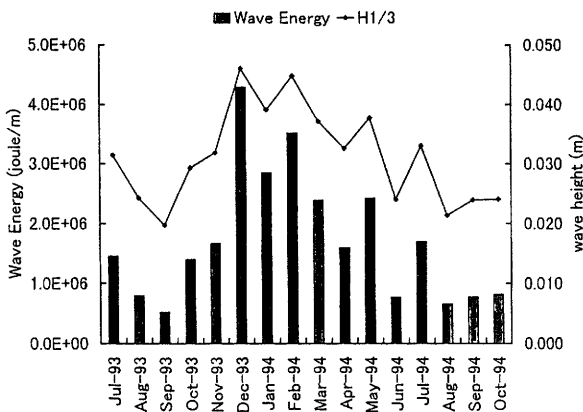


図-13 来襲波の波高とエネルギーの月別変化高

向・風速データを用い、図-9 の A~D の各点に来襲する波のエネルギーを計算した。図-11、12 の屈折計算の結果から卓越波向きに対して波向き線はほぼ平行であり、また神西湖の盆状の地形からも浅水変形の影響は小さいと考えられるので、以下では推算された沖波の波の諸元を基に考察する。

風向・風速は毎日変動するが、A~D 点の各点に対する風向に対応するフェッチと平均水深を求め、日平均風速から推算される月当たりの波エネルギー E_m を次式を用いて求めた。

$$E_m = \sum_{\text{day}} \frac{1}{8} \rho g H_{1/3,d}^2 C_{g,d} \cos \alpha_d \quad (1)$$

ここに、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 $H_{1/3}$ は推算沖波有義波高、 C_g は沖波の群速度であるが深海波条件から波速の 1/2 となる。また、 α は沖波の波向きが汀線と成す角であり、下付添字 d は 1 日ごとの推算値、 Σ は 1 ヶ月にわたる総和を表す。St.C の地点で計算された月平均の来襲波の有義波高 $H_{1/3}$ と

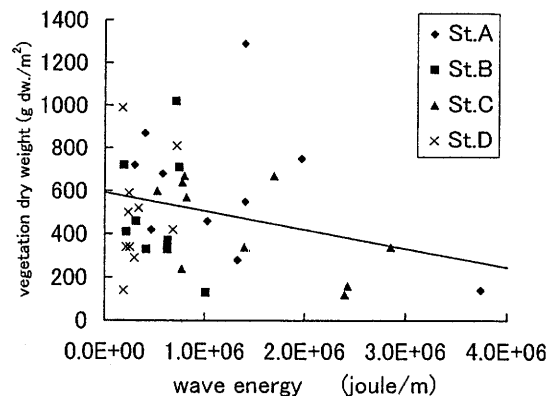


図-14 ヨシの現存量と来襲波浪の関係 (全ての観測月)

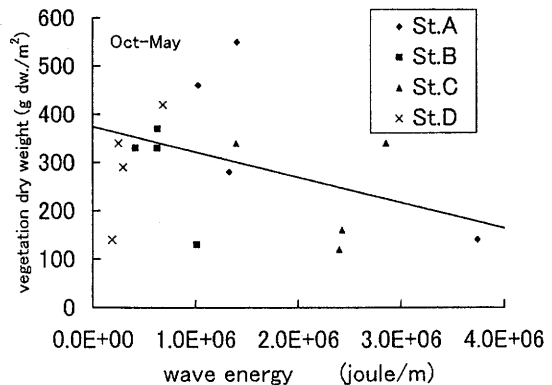


図-15 ヨシの現存量と来襲波浪の関係 (10月~6月)

月当たりの来襲波エネルギー E_m の月別変化を図-13に示す。

図-14は、秋葉・細見が測定したヨシ現存量のデータに対してその月の来襲波エネルギー E_m の総和との関係をプロットしたものである。来襲波エネルギー E_m が小さい場合にはヨシ現存量のばらつきが大きく十分な相関は認められないが、 E_m が大きくなるほど、ヨシ現存量は減少する関係が認められる。全体のデータの相関係数は-0.266であった。図中には最小自乗法による最適直線も示した。

前述のようにヨシは6月から出芽し、夏期に著しい成長を示す。夏期は風浪も弱く、ヨシの現存量は生体としての生長量の現れているのであって来襲波浪の影響は少ないと考えられる。そこで、ヨシの成長力が衰える10月から5月までの現存量データのみ抽出して、その時の月平均波高との相関を調べたものが図-15である。図-14と比べ、来襲波浪とヨシの現存量との負の相関がより明確になっている（相関係数は-0.410）ことがわかる。

4. 結論

(1) 宍道湖において来襲波浪と植生の繁茂域の関係を調べたところ、植生の繁茂域は、現地の卓越風向である西風に対する風上側および湖岸地形に遮蔽する領域と一致しており、護岸の設置など人工化の影響は大きいものの現在の植生の繁茂域は、卓越風向による風波の静穏域と対応していることがわかった。

(2) 自然湖岸が多く残されている神西湖において、来襲する風波のエネルギー量と、秋葉・細見の調査した植生の現存量との関係を調べたところ、月ごとに求めた来襲風浪と植生の現存量には負の相関が認められ、特にヨシの成長力が衰える10月～5月までのデータに対する相関はより明確となった。

本研究では、湖岸植生の現存量と来襲波の相関関係を季節変動を含めて議論した。来襲波の増大が植生の現存量の減少につながる力学的要因については、植生体に作用する波力ならびに風による流体力が植生の土壌を把駐する力を上回ることで、波による底面付近の流れによって地盤土壌が流失すること、等が考えられるが、これらの検討は今後の課題としたい。前者の植生群に作用する波力については多くの研究^{12)・13)}があり、後者についても砂浜の侵食・堆積の指標であるC値に基づいた研究¹⁴⁾がある。植生の繁茂には、物理環境のみならず塩分濃度・栄養塩濃度の化学環境や植物生体としての特性も関与する。こうした要因が今回の結果にどの程度含まれているかも今後検討すべき課題である。

謝辞

国土交通省出雲河川事務所、島根県内水面水産試験場、島根県出雲土木建築事務所から水深測量データなどの提供を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 宇多高明, 吉田隆昌, 西嶋照毅, 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, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.1111-1115 (1994)
- 2) 林健二郎, 木村保夫他: 湖沼における植生護岸の形成とその効果, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1116-1120 (1999)
- 3) 中村圭吾, 門倉伸行, 宗像義之, 島谷幸宏, 宇多高明: 消波浮島による湖岸植生帯の復元に関する研究, 環境システム研究, Vol.27, pp.305-314 (1999)
- 4) 楠田哲也: 環境に関わる水理学の研究展望, 土木学会論文集, No.747, II-65, pp.1-14 (2003)
- 5) Morris, P.A., N. M. Hill, E.G. Reekie and H. L. Hewlin: Lakeshore diversity and rarity relationships along interacting disturbance gradients: catchment area, wave action and depth, Biological Conservation, Vol. 106, pp.79-90 (2002)
- 6) Keddy, P. A.: Quantifying within-lake gradients of wave energy: Interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in Axe Lake, Ontario, Aquatic Botany, Vol.14, pp.41-58 (1982)
- 7) 坂本巖: 宍道湖のヤマトシジミの生息地としての湖岸ヨシ帯, 汽水湖研究, Vol.2, pp.1-7 (1992)
- 8) 森脇晋平ら: 漁場環境保全対策事業, 平成13年度島根県内水面水産試験場事業報告, pp.148-166 (2003)
- 9) 木村晃・橋本典明: 波浪の推算法, 「海岸施設設計便覧」第2章, 2.3, 土木学会, pp.25-30 (2000)
- 10) 平石哲也: 屈折方程式, 「海岸波動」, 第1編, 第3章, 3.1, 土木学会海岸工学委員会, pp.15-19 (1994)
- 11) 秋葉道宏, 細見正明: 神西湖沿岸湿地におけるヨシの分布, 一ヨシの現存量と環境因子の関係一, 汽水湖研究, Vol.4, pp.7-10 (1997)
- 12) 長谷川寛: 藻場基盤に作用する海藻経路の波力について, 土木学会論文集, No.621, II-47, pp.153-165 (1999)
- 13) 林健二郎・藤井優宏・重村利幸・萩原運弘: 水辺植生に作用する波力と消波機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.891-895 (2001)
- 14) 中村圭吾他: Relation between littoral zone vegetation and wave action in Lake Shinji, 第9回世界湖沼会議発表文集, pp.569~572 (2001)