

琵琶湖における湖岸植生の繁茂限界について

西 鳥 照 毅*・宇 多 高 明**・中 辻 崇 浩***

1. ま え が き

湖岸に繁茂する植生は、湖岸の環境・景観形成や多様な生物種の育成に役立っている。近年、湖の環境保護の声がとみに高まっており、これらの植生を含む湖岸域の環境向上を図る試みが各地で行われている。滋賀県にあってわが国最大の規模を持つ琵琶湖では、湖岸に繁茂するヨシなどの水生植物を守るためのヨシ保護条例が制定されるとともに、失われたヨシ群落などの復元も行われつつある。このような植生の繁茂を考えた場合、その支配条件としてはまず水生か陸生かを区分する上で水深が絶対的な指標となる。しかし、同じ水深でも波浪の作用を受けるかどうかとも重要である。なぜなら、来襲波浪のエネルギーレベルが高ければ湖岸付近の底質は砂礫が主となり、しかもそこでは活発な漂砂移動が生じるから植生の繁茂に適さないと考えられ、逆に作用波高が低ければシルト・粘土質の底質成分の堆積が卓越する結果、植生の繁茂にとって都合の良い土壌条件になると考えられるからである。このように、波浪条件は植生の繁茂条件を規定する重要な条件になると考えられるが、波浪作用に関する検討は河川流の作用と比較して取り上げられた例はごく少ない。湖の規模がかなり大きく、したがって風波の作用が無視できない湖は全国的にかなりの数にのぼるので、このような視点からの検討は十分価値があると思われる。このことから琵琶湖を研究対象として、湖岸植生の繁茂限界について考察する。

琵琶湖は水面積が大きいために、冬季の季節風などの作用によりかなり高い波浪が発達し、それが湖岸における植生繁茂の制約条件を与えている。この問題に関連し西鳥ら (1997) は、琵琶湖の湖岸植生の繁茂限界波高を実態データに基づいて検討し、日平均波高約 25 cm が限界波高になることを明らかにした。植生の繁茂限界を作用波の波高で表す方法は、第一次近似としては有効であるが、植生の繁茂は湖底勾配にも関係する (宇多ら, 1997) と同時に、植生繁茂の基盤となる、土壌の底質粒径も場

所的にかなり大きく異なることを考慮すれば、これらのパラメータをも含んで初めてより普遍的な繁茂限界になると考えられる。以下ではこのような視点から植生繁茂限界について検討する。

2. 琵琶湖の地形と気象

琵琶湖は、面積 674 km²、最大水深約 104 m のわが国第 1 の規模を有する湖である。図-1 には、琵琶湖の地形と琵琶湖東岸・西岸の調査範囲を示す。琵琶湖東岸の調査区域は、愛知川河口から琵琶湖の北端近傍に位置する尾上漁港までの延長約 40 km の範囲である。一方、琵琶湖西岸にあっては琵琶湖大橋の北側に隣接する真野川河口から知内川河口の北東 3 km まで延長約 50 km の範囲である。琵琶湖東岸の湖岸線は全体として凹状を呈しているのに対し、琵琶湖西岸は北部に流入する安曇川河口デルタが湖に突出しているため全体に凸状である。

図-1 に示すように、琵琶湖東岸に位置する彦根地方気象台での 1973~1995 年の気象観測データをもとに、各季節ごと、および通年の風配図を描いたのが図-2~図-6 である。各図では全風のデータだけではなく、風速 10

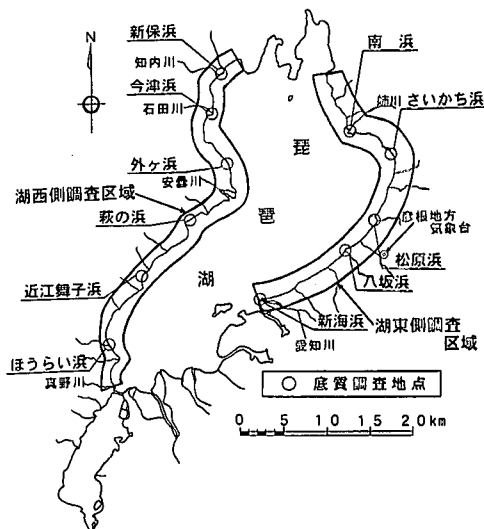


図-1 琵琶湖内の調査区域

* 正会員 工修 滋賀県土木本土木事務所
** 正会員 工博 建設省土木研究所
*** 正会員 (株)建設技術研究所

m/s以上の強風の発生頻度も併せて示している。季節ごとの特性を調べると、春季(図-2)では、NWを中心とする強風の出現頻度が著しく高い。これと逆方向のSEの風向もあるが、この風向では強風は全く発生していない。夏季(図-3)では、SEまたはSSE方向の頻度が著しく高まるが、強風の発生頻度は冬季のNW方向の場合と比較して高くない。秋季(図-4)では、春季とよく似た風向頻度であるが、春季と比較してSSEおよびSE方向の発生頻度がやや高い。冬季(図-5)では、秋季と非常によく似た風向出現頻度であり、NW方向の季節風の影響を強く受ける。通年(図-6)では、冬季のNW方向からの強風と、夏季を中心とするSSEまたはSE方向の風によって特徴付けられる。

琵琶湖は南西から北東方向に細長い形状を有するために、琵琶湖東岸ではNW方向からの風に起因する波浪の作用が著しい。一方、西岸の安曇川河口の南側ではSSEとSE方向からの風波の作用が卓越するが、安曇川河口デルタの北側の湖岸では安曇川河口デルタ自身による遮蔽効果のためにSSEおよびSE方向からの風波の作用は弱い。植生の繁茂限界は第一義的には波高

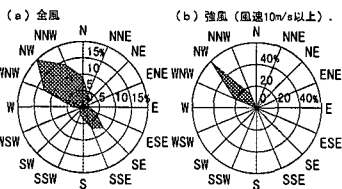


図-2 琵琶湖の風配図(春季: 3~5月)

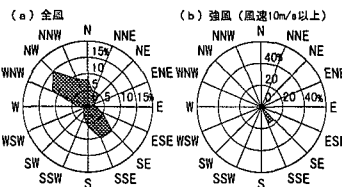


図-3 琵琶湖の風配図(夏季: 6~8月)

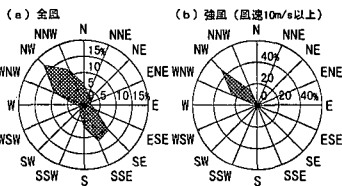


図-4 琵琶湖の風配図(秋季: 9~11月)

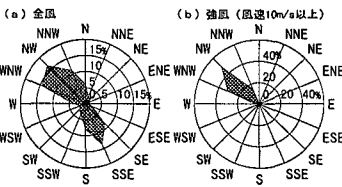


図-5 琵琶湖の風配図(冬季: 12~2月)

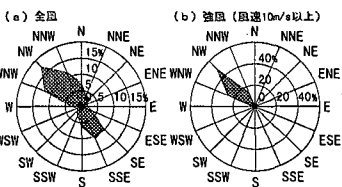


図-6 琵琶湖の風配図(通年: 1~12月)

により支配されるが、湖底勾配にも関係が見られ、さらに湖底勾配は湖浜の材料にも関係すると考えられる。このことから、琵琶湖では気象データに基づく波浪推算だけではなく、湖底勾配や湖浜材料の底質中央粒径のデータも含めた検討を行うこととし、湖浜の代表地点で底質採取と粒度分析を行った。図-1には、琵琶湖湖浜の底質調査地域を示す。底質調査は1994年11月に行った。調査地域は全体で11カ所、琵琶湖東岸から5カ所(南浜、さいかち浜、松原浜、八坂浜、新海浜)、西岸から6カ所(ほうらい浜、近江舞子浜、萩の浜、外ヶ浜、今津浜、新保浜)を選んだ。いずれの箇所でも2ないし3測線を配置し、B.S.L.+0.0m(平均汀線)付近、波による地形変化の限界水深付近、および波による地形変化の限界水深より沖合の1地点で底質サンプリングを行い、ふるい分け分析を行って中央粒径を求めた。各海浜における波による地形変化の限界水深は、安川ら(1988)などに示された深淺図を参考にして推定した。表-1にはこれらの調査結果を一括して示す。

表-1 琵琶湖湖浜の底質調査結果

湖 浜 名	d_{50} (mm): 平均汀線付近	d_{50} (mm): 地形変化 の限界水深付近	d_{50} (mm): 地形変化 の限界水深以深
ほうらい浜	0.7	1.6	0.3
近江舞子浜	1.4	3.0	2.0
萩の浜	0.9	0.2	0.2
外ヶ浜	1.1	4.0	0.4
今津浜	1.9	6.9	2.6
南 浜	1.8	3.1	3.0
松 原 浜	1.2	0.2	0.2
八 坂 浜	0.8	2.1	0.3
新 海 浜	1.0	0.4	0.3

湖岸の植生帯幅は、1994年撮影の垂直空中写真を利用して読みとった。図-7に示すように、琵琶湖東岸の愛知川河口(新海浜)から北端の尾上漁港まで100m間隔に測点を設け、測点ごとに湖岸から植生帯の沖端までの距離を読み取った。このとき、測点ごとに離散的データとして植生帯幅を測定した。全調査区域について同様な方法によって植生帯幅を測定したのち、琵琶湖東岸においては5測点での移動平均を行い、平均的な傾向を把握した。琵琶湖西岸についても、図-8に示す範囲内の515点で空中写真から植生帯幅を測定した。

波浪推算には、彦根気象台における1973~1995年の風向風速データを用い、3時間おきの観測値を用いた。図-7, 8に示す東岸、西岸の湖岸線に沿うそれぞれ385, 515測点のうち、0.5km間隔に並んだ、番号が5の倍数となる測点で計算を行うこととし、各地点ごとに吹送距離を

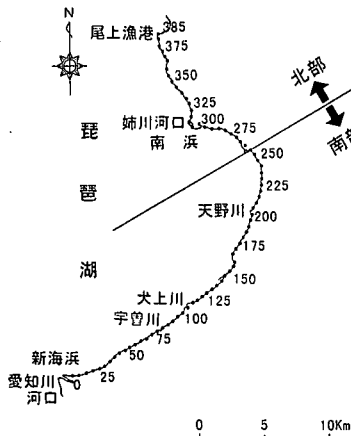


図-7 琵琶湖東岸における測点配置

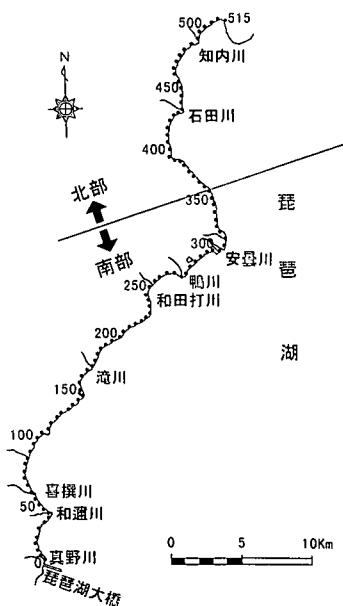


図-8 琵琶湖西岸における測点配置

読み取った。吹送距離と風速値から SMB 法により波浪の推算を行ったが、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ことから、各方向別に波高を大きい順に並べ、大きいものから 1/3 番目までの平均値を求めた。さらに、各方向別の出現回数を重みとして平均有義波高を算出した。

各測点の湖底勾配については、琵琶湖の深浅図 (1994 年水資源開発公団測量) をもとに、B.S.L.+0.0 m (平均汀線) から B.S.L.-3.0 m までの沖向き距離を読みとり、その逆数を湖底勾配とした。

3. 湖岸植生の繁茂限界

図-9 には、琵琶湖東岸における植生帯幅、平均有義波

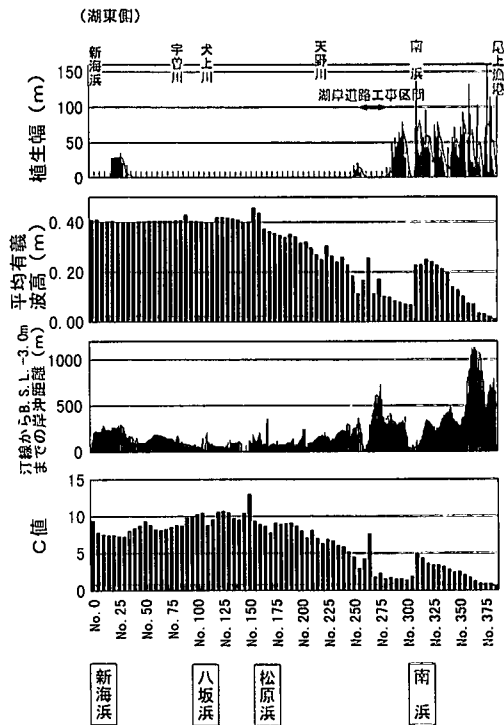


図-9 植生繁茂限界の検討結果 (湖東側)

高、平均汀線から沖へ B.S.L.-3.0 m までの沖向き距離の沿岸分布を示す。植生は、No. 250 以北に集中して現れている。No. 260~No. 280 にはもともと植生帯があったが、そこは湖岸道路の建設のために植生帯が消失した場所である。図-1, 7 を参照すれば、姉川河口以北では吹送距離が短いため冬季の NW を中心とする風浪の作用を受けにくいこと、また No. 250~No. 310 (姉川河口) では姉川河口部が大きく突出して波を遮蔽するために同じく波浪の作用を受けにくい地域である。図-9 に示す平均有義波高にはこの特徴が明瞭に現れており、平均有義波高がほぼ 25 cm を限界値として、それより波高が低いことが植生帯の形成される限界となっている。また、波高が低いほど植生帯幅が広がる傾向がある。なお、ここで用いている平均有義波高は、彦根地方気象台における 3 時間おきの風速測定値から算出したものである。

一方、図-9 において、湖底勾配と植生帯や平均有義波高との関係を調べると、全般的に平均有義波高が高い区域では湖底勾配が急であり (すなわち、汀線から B.S.L.-3.0 m の等深線までの沖向き距離が短く)、低波高の区域では勾配が緩やかという逆相関の傾向が認められる。そして、湖底勾配がほぼ 3/200 (すなわち汀線から -3 m の等深線までの沖向き距離が 200 m) を境に、それより勾配が緩ければ植生が繁茂しているようにも見える。このことは、第一次近似としては植生の繁茂限界が平均有義

波高により与えられるものの、より正確には、湖底勾配も考慮に入れるべき必要性を示していると考えられる。波による前浜地形変化に関し、堀川ら（1973）は、作用波高・周期、海浜材料の中央粒径および湖底勾配をパラメータとして、前浜の侵食・堆積の判別式を提案した。湖岸付近での植生の繁茂について考えれば、前浜の侵食・堆積と類似したパラメータにより植生の繁茂が支配されている可能性が高いと考えられる。なぜなら、現象的に見たとき植生が生育するには植生が安定して根を張るべき土壌が必要であり、それが失われる場所では植生の生育は困難と考えられるからである。湖岸植生の生育条件として波高が第一義的に重要であるが、植生の繁茂にはそれ以外に湖底勾配も関係し、さらに湖底勾配はその場所の粒径とも密接に関連するはずであるから、結果的に堀川らと同じパラメータが必要になる。堀川らの前浜の侵食・堆積の判別は、 C パラメータにより判別される。ここに、 C 値は、

$$C = H/L \cdot (\tan \beta)^{0.27} \cdot (d_{50}/L)^{-0.67} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここに、 H (cm) : 波高, L (cm) : 波長, $\tan \beta$: 海浜勾配, d_{50} (cm) : 海浜材料の中央粒径である。以下ではこの式を植生の繁茂限界に適用してみる。

推算波高・周期および上述の湖底勾配を用いるとともに、湖浜材料の中央粒径については十分ではないが、表-1に示したように1994年実施の現地データがあるので、これをもとにまず図-10のように湖東・湖西側の湖浜での湖浜材料の中央粒径の平均値を整理した。 d_{50} は場所的にかんがりのばらつきがあるが、湖東では南浜と松原浜以南で、湖西では今津浜と外ヶ浜以南でかなり大きな粒径の相違が見られる。そこで、湖東については松原浜、八坂浜、新海浜で平均を求めると1.0 mmとなる。南浜では $d_{50}=1.8$ mmと他の地区よりも粒径が大きい。

粒度調査地点数は植生の繁茂状況調査地点数と比較すると少ないので、粒径変化点を定めてそれらの間は一定の粒径とする必要がある。そこで、図-7の地形図において、姉川の河口デルタの突出地形と、北西風の作用によ

て南西方向の沿岸漂砂の発達する区域とを区分する No. 260 付近に境界を定める。同様に図-8より、湖西にあってはほうらい浜、近江舞子浜、萩の浜、外ヶ浜の4点の平均を求めると $d_{50}=1.0$ mmとなる。また今津浜では1.9 mmである。さらに、湖西の湖浜材料の中央粒径の分岐点を、図-8に示したように安曇川河口左岸の No. 355 付近に置く。この理由として、No. 355 より北側の湖岸はSE または SSE 方向からの波浪の作用をほとんど受けて、石田川からの土砂供給の影響が考えられる区域であることによる。

図-9には、以上の方法で求めた C 値を示す。植生はNo. 250 以北で集中的に見られるが、そこでの C 値はほぼ4 以下となっている。すなわち、湖岸植生の繁茂限界は C 値がほぼ4 で与えられ、これより大きい C 値では植生の繁茂が悪いことが分かる。No. 25 付近にある局所的な植生帯については、 C 値が7 とこの条件を満足していないが、その周辺域では相対的に C 値が低いことから、定性的傾向は満足している。

同様な検討は琵琶湖西岸でも行うことができる。図-11には湖西側での検討結果を示す。琵琶湖西岸では植生はごく限られた範囲でのみ見られる。最も広い植生帯は安曇川河口の北側の No. 355~No. 397 の区域である。それに続くのが南部の真野川河口の北側隣接部の No.

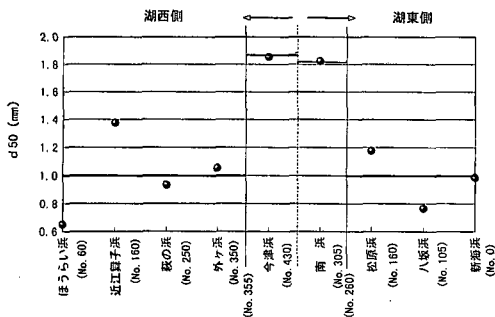


図-10 各湖浜の d_{50} の分布

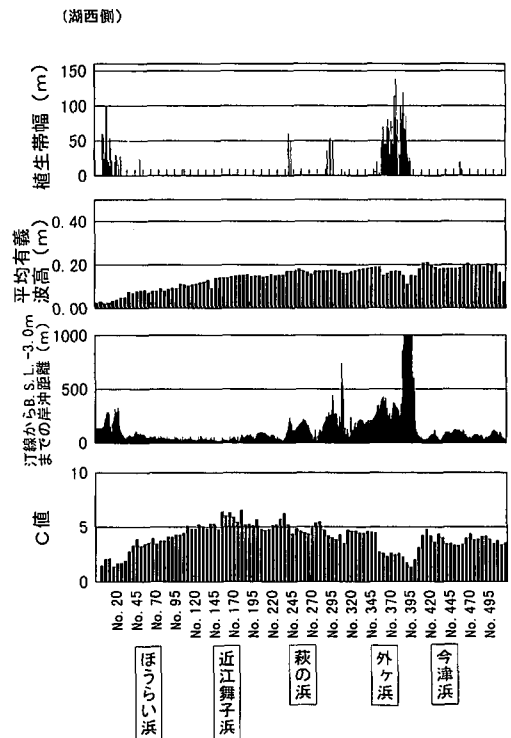


図-11 植生繁茂限界の検討結果（湖西側）

10～No. 33 の区域である。そのほか、萩の浜南端部の No. 245～No. 248 や安曇川河口の南側の No. 292～No. 300 付近でも局所的な植生帯が見られる。このような植生の繁茂に対して平均有義波高を調べると、平均有義波高は北向きに単調増加傾向にあり、最大値は約 20 cm である。植生の繁茂限界が琵琶湖東岸と同様に平均有義波高 25 cm で与えられるとすれば、琵琶湖西岸では全域で平均有義波高が 20 cm 以下であることから、全ての地域で植生の繁茂が可能となり、これは測定結果と大きく異なる。したがって植生の繁茂限界を平均有義波高で与えることには明らかに限界があると言える。

図-11 には、平均汀線から-3 m の等深線までの沖向き距離も示しているが、これによれば、植生の繁茂が見られる地域ではいずれも湖底勾配が相対的に緩やかであること、また調査区域の中央より南部の No. 70 から No. 245 では琵琶湖東岸と比較してはるかに急勾配なことが分かる。そして、これらの区域では平均有義波高が低いにもかかわらず植生の繁茂が見られないことから、植生の繁茂に対して湖底勾配が大きく関与すると推定される。

図-11 の最下段には C 値の分布を示す。これによれば、安曇川河口北側の、No. 355～No. 397 の区域、南部の真野川河口の北側隣接部の No. 10～No. 33 の区域では植生帯の有無は、 $C=4$ で明瞭に区分されている。そのほか、萩の浜南端部の No. 245～No. 248 や、安曇川河口南側の No. 295～No. 300 付近での局所的な植生帯についても、C 値は 4 にごく近い値である。以上のように、琵琶湖西岸では植生の繁茂がほぼ $C=4$ で区分される。

波の作用下での、前浜の侵食・堆積の判別式で使われる C 値が、湖岸植生の繁茂限界という全く異なる現象にも適用可能なことは興味深い。さらに、波による岸沖漂砂による海浜変形について、規則波水理模型実験によって検討した堀川らの研究では、侵食・堆積の限界値は $C=4\sim9$ で与えられる。これと比較して琵琶湖での植生の繁茂限界は、この前浜の侵食・堆積限界と非常によい一致を示すことが注目される。

4. 湖内の漂砂と植生の繁茂空間の創生

繁茂限界は湖岸のある地点の波浪条件、湖底勾配、湖浜材料の中央粒径に依存する係数 C 値で与えられる。この指標はある一地点で定められるものであるが、湖浜の湖底勾配や湖浜材料の中央粒径などは局地的な波浪条件だけではなく、風波に起因する沿岸漂砂の作用下のもとでの、湖浜の地形的特性や人工構造物の設置状況などにも大きく関与する。したがってよりマクロな視点からの検討が必ず必要である。

湖浜において波が斜め入射すれば、沿岸漂砂が生じる

が、湖岸付近の地形や人工構造物によって沿岸漂砂の移動が阻止されれば、それにもなって沿岸漂砂の上手側では湖浜が形成され、下手側では侵食されて湖浜は失われ、あるいは狭くなる。したがってまず地形的、大局的に見た沿岸漂砂の条件から湖岸植生の繁茂が可能な空間が形成されうるかどうかについて検討することが必要である。その上で、C 値による判定によって植生の繁茂限界について検討する必要がある。検討の順序を逆にすることは、例えば沿岸漂砂が阻止された場所にあつては植生の繁茂空間の喪失を招くことになる。なお、沿岸漂砂を阻止して安定な砂浜を形成させる手法については、宇多 (1997) に示した現地海岸での事例を参照されたい。

5. ま と め

琵琶湖内の植生の繁茂に関し、植生の根が生えるべき土壌を安定的に保持できるかどうかという点から検討した結果、植生の繁茂限界は波高だけではなく湖岸付近の湖底勾配や湖浜材料の中央粒径にも依存することが見い出された。そして堀川ら (1973) の前浜侵食・堆積の判別式が、湖岸植生の繁茂限界の判別式としても適用可能であり、その限界値が前浜侵食・堆積の限界値とほぼ同様の、 $C=4$ で与えられることが分かった。一方、湖浜では斜め入射波によって発生する沿岸漂砂移動が人工構造物などによって阻止されれば、漂砂の上手側では土砂が堆積して湖浜が形成され、下手側では侵食されて湖浜は失われる。したがって、植生の繁茂空間の創出においては、上述の局所的な視点からの検討を行う前に、対象区域の地形的・大局的に見た漂砂条件から、湖岸植生の繁茂が可能な空間が形成されうるかどうかについて検討することが必要である。湖岸の植生帯の発達は一見するとランダムに見えるが、実際には風波の波浪条件 (波高、周期、入射角)、湖底勾配、湖浜材料の中央粒径と密接な関係を有している。したがってその地点の土壌条件など、あまりに局所的な条件のみにとらわれずに、より広域的な視点のもとで検討を行うことが湖の植生環境の創生においては重要である。

参 考 文 献

- 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三 (1973): 波による海浜変形に関する一考察, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 357-363.
西島照毅・宇多高明・中辻崇浩 (1997): 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.
宇多高明・小菅 晋・岡本正一・伊藤正光 (1997): 風波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.
安川 歩・宇多高明・田村徳郎・加本 実・富士川洋一 (1988): 琵琶湖における風波による湖浜変形の実態, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 472-476.
宇多高明 (1997): 「日本の海岸侵食」, 山海堂, p. 442.