

風波による琵琶湖旧河口デルタの変形とバリアー形成の現地実測

西 嶋 照 毅*・宇 多 高 明**・富 士 川 洋 一***・中 辻 崇 浩****

1. はじめに

わが国一の規模を有する湖である琵琶湖では近年湖浜の侵食が進み、良好な砂浜環境が湖岸各地で失われつつある。例えば、旧野洲川では野洲川放水路の建設に伴って流出土砂量が激減し、これにより旧河口部周辺の汀線が大きく後退している。これに伴い旧河口砂州上の植生が湖面下に残され、枯死するなどの被害が生じている。そこで琵琶湖の湖浜らしさを失うことなしにこのような状況を改善するために、滋賀県では養浜工の計画を立て湖内各地でその実施を進めている。ここでは、その一例として滋賀県の守山市で実施した守山なぎさ公園での養浜工を取り上げ、湖浜侵食の経緯とそれに対する対策工としての養浜の効果について現地データをもとに分析する。ところで、その水深が来襲波の碎波波高と同程度ほどに浅い海域では、沿岸漂砂により運ばれた土砂が浅海域に堆積してしばしばバリアーアイランド（以下、バリアーと呼ぶ）が形成される。宇多ほか（1994a）は、バリアー形成海域の水深と入射波高の比を変えた移動床実験によりバリアー発達の可否を調べ、水深が換算沖波波高の約 1.3 倍以下ならばバリアーが発達しうること示した。多くの現地海岸で見られるバリアーは、その形状がほぼ安定状態に達しているものがほとんどであり、最近になって急にバリアーが発達した例を探すことは難しい。したがって実験で見られた現象を現地海岸で確認することは困難である。一方、琵琶湖の旧野洲川の河口では風波の作用によりバリアーが急速に形成されたことから、この実例分析はバリアーの形成機構に関する格好の研究対象となると考えられる。そこで西嶋ら（1996）に続いて、琵琶湖の野洲川河口でバリアー形成の実測を行うとともに、バリアー形成に伴う湖浜変形のモデル化を図る。

2. 守山なぎさ公園周辺の地形概要

図-1 に示すように、守山なぎさ公園は琵琶湖北湖の

南端部近くに位置する旧野洲川南流の河口部にある。野洲川では、1979 年、南流と北流の間に放水路が開削されたため、旧南流においても河川からの土砂の流下が停止し、これに伴って河口部汀線が近年大きく後退しつつある（宇多ら、1995）。

図-2 には、空中写真をもとにした 1973 年より 1991 年まで約 20 年間の汀線変化を示す。図に示す守山新川は旧野洲川南流の支流の一つであったが、河口からの流出土砂量の減少に伴って著しい汀線後退が発生した。1973 年には河口がデルタ状に大きく突出していたが、経年的に汀線が後退し汀線の最大後退量は約 130 m に達した。また、守山新川の河口デルタの後退とともに守山なぎさ公園の東部の汀線も後退したことがわかる。一方、旧野洲川南流河口の西側では 1978～1981 年に湖岸堤（兼用道路）が建設され、護岸が造られたため人為的地形変化が生じたが、工事終了後の 1986～1991 年の汀線変化では、新設の護岸前面を沿岸漂砂が通過し、砂嘴を形成しつつ土砂が堆積したことがわかる。以上の点は、長期的に見ると守山なぎさ公園の前浜では東西両方向に向かう沿岸漂砂により土砂が流出し、次第に侵食が進む状況にあったことを示している。

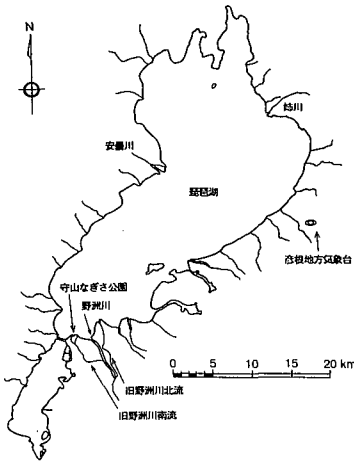


図-1 守山なぎさ公園位置図

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

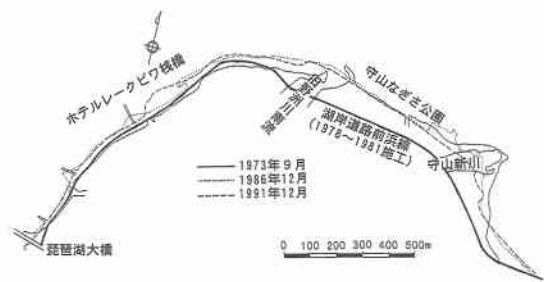


図-2 守山なぎさ公園汀線変化図

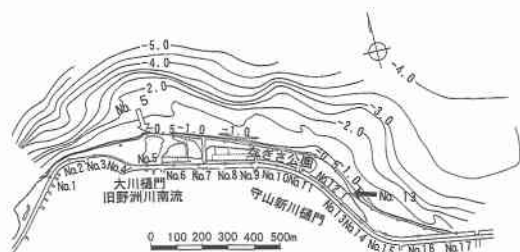


図-3 守山なぎさ公園周辺の湖浜地形

3. 守山なぎさ公園周辺の湖浜地形

守山なぎさ公園周辺の湖浜地形を図-3に示す。これは1992年11月の測量によって得られたもので、基準面はB.S.L. 0m (T.P.84.371m)にある。まず、沖合の地形に注目すると、守山新川の河口沖では-3.5mまでの等深線の突出が見られる。同様に旧野洲川南流の河口沖でも-2.0m以深の等深線が沖向きに突出しており、しかも-2.0m以深の湖底勾配は、-2.0m以浅と比較してはるかに急である。いずれの河口沖でも-1.0m~-2.0mの間は緩勾配の斜面となっており、-1.0m以浅が非常に急なことを考え併せると、波による地形変化の限界水深はほぼ-1.0m~-2.0mにあると推定される。一方、汀線付近の地形を調べると、旧野洲川河口と守山新川の河口には湖側をバリアーによって塞がれた内湖が形成されている。図-3には、以後の解析の便を考えて測線番号を定めた。番号は西から東向きに配置されており、守山なぎさ公園で養浜を行った区間は、No.7~No.11の約400mである。ここでは、1993年9月~10月に中央粒径0.45mmの砂、13,200m³が汀線付近に投入された。

4. 現地写真による湖浜状況調査

写真-1には養浜により拡張された守山なぎさ公園の湖浜の状況を示す。養浜前、湖岸侵食により写真中央の3本の松の根元を通して沿岸方向に現況汀線と平行な線まで汀線が後退し、突堤の右隣りの木が湖内に孤立した

(宇多ほか, 1994b)。こうした状況を改善するために養浜が行われた。なぎさ公園の東端には写真に示すように長さ40mの突堤が設置されており、これにより沿岸方向への土砂流出が防がれている。

写真-2は、なぎさ公園の西部、すなわち写真-1の右上部分の湖岸状況である。写真中央に見えるのが旧野洲川南流である。旧南流は水門を残すのみとなっている。写真-2に示すようにバリアーは左側のなぎさ公園の汀線より連続かつ直線的に延びている。

写真-3は写真-2の左端区域を拡大したものである。左(東)、右(西)2箇所にバリアーによって閉じ込められた水域がある。バリアーの内側の閉鎖性水域では水生植物の生育が盛んであるのに対して、その外縁部をつなぐ汀線に沿って砂が堆積している。右側のバリアーでは汀線がフック状に後退している。そして汀線が後退を始める位置には柳の木がある。写真-4は、1994年10月24日に撮影した柳の木の下手側のフック状湖浜 (No.4付近)の状況である。No.4よりNo.5方向を望むと、密生した柳がヘッドランド効果 (宇多ほか, 1994b)を発揮し



写真-1 守山なぎさ公園の湖浜の状況



写真-2 守山なぎさ公園西部の状況 (1)



写真-3 守山なぎさ公園西部の状況 (2)



写真-4 柳の下手側のフック状湖浜 (No.4 付近)



写真-6 水中に孤立した柳



写真-5 砂防突堤の東側隣接部の状況



写真-7 No.14 より西側を望む

ている。その位置を図-3 に白矢印で示す。これらより、当地点における沿岸漂砂の卓越方向は西向きであり、フック状汀線は突出した柳の根が沿岸漂砂を阻止するため形成されたものと言える。また、フック状汀線には浜崖が形成されていることから、現況でも沿岸漂砂が西向きに移動するが、柳の木の沿岸漂砂阻止効果はかなりあり、そのため養浜砂の流出が抑制されていることもわかる。そして現在でもこの付近で西向きの漂砂が卓越することから、旧河口前面のバリアーも西向きの沿岸漂砂により発達してきたと考えられる。

写真-5 は、守山なぎさ公園の東端部を区切る防砂突堤の東側隣接部の状況である。突堤のすぐ東側には守山新川の旧河口がある。ここも水門を残して塞がれた。旧河口には沿岸方向に白いバリアーが伸び、河口は完全に閉塞している。また、なぎさ公園東端の突堤（天端高 B.S.L.+0.4 m）上にも砂が堆積し、この部分はバリアー、突堤、湖浜の区別がつかない。これは 1995 年 5 月に湖水位が B.S.L.+0.93 m まで急上昇し、かつ波が作用したため突堤を越えて沿岸方向東向きに漂砂が流出し、その一部が突堤上にまで堆積したことを示す。また、写真-5 によるとバリアーの幅は沿岸方向にほぼ一定であって、バリアー内の水域深くまで侵入せず小高い丘状に砂が堆積している。この写真はバリアーの形成土砂が明らかになぎさ公園より沿岸漂砂によって運ばれたことを示す。

突堤の東側地区（No.12 付近）はやや侵食傾向にあるが、ここには水中に孤立した柳がある。No.13 よりこの柳を撮影したのが写真-6 である。この柳の位置は図-3 に黒矢印でも示すが、そこで汀線が大きく曲がっており、全体に突出している。ここより東側の汀線は大きく湾曲

している。その状況は No.14 より西側を望んだ写真-7 にも明瞭に表れている。No.14 より西側を撮影した写真-7 と、No.4 より東側を望んだ写真-4 とはフック状砂浜の広がり方が全く逆である。このことは、両者とも柳の木のヘッドランド効果が発揮されていること、そしてそれぞれ地点で沿岸漂砂の方向が逆、すなわち河口デルタから遠ざかる方向であることを示している。

5. 養浜に伴う湖浜地形の変化

図-3 に示す測線 No.4～No.16 の湖浜縦断形の変化を図-4 に示す。養浜前の湖浜の縦断形は 1992 年 11 月に測定され、養浜砂の投入、整地は 1993 年 9 月～10 月に No.7～No.11 の範囲で行われたから、1994 年 3 月の縦断形が養浜直後に相当する。養浜により No.8～No.11 の範囲で汀線が約 25 m 前進し前浜が広がった。No.8～No.10 の断面変化は互いによく似ているので、代表的に No.10 で縦断形変化の詳細を調べると、養浜後 0.5 m～0.7 m の高さのバームが発達し、前浜が 1/6 勾配と急傾斜となったが、-1.2 m より沖合の平坦面では有意な地形変化は見られない。また汀線は時間的にやや後退傾向である。また、1994 年 10 月の縦断形のみはバームが消失しているが、これは、夏季に海水浴利用のためビーチクリーナーにより汀線付近が均されたことによる。以上より養浜区域での縦断形変化は、ほぼ B.S.L. 0.7 m～-1.2 m の間で生じていることがわかる。柳の根が湖に突出し、そこで沿岸漂砂の阻止効果の出ている No.5 では養浜後も汀線は後退しつつあり、この時、湖浜縦断はほぼ平行移動しつつ 0.5 m～-1.2 m の間で地形変化が生じている。No.11 に位置する突堤の左右岸の縦断形比

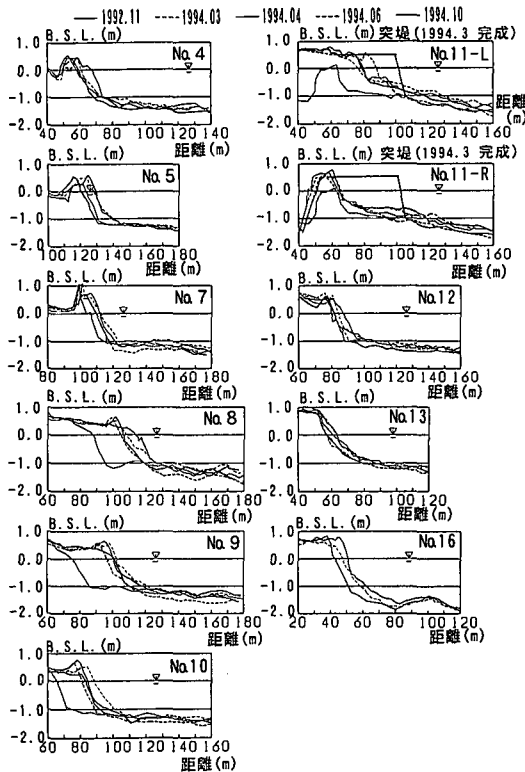


図-4 湖浜縦断形の変化

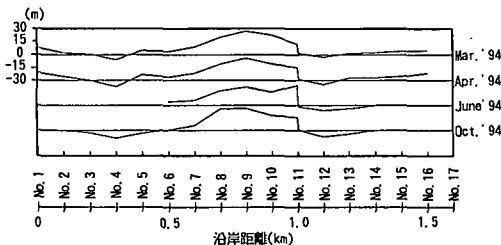


図-5 汀線変化量の沿岸分布

較では左(西)側に対し右(東)側の汀線が大きく後退しており、突堤の漂砂阻止効果が表れている。

図-5には、1992年11月を基準とした汀線変化量の沿岸分布を示す。養浜工はNo.7～No.11の間で行われたが、養浜と同時に、西向き漂砂により土砂流出が始まった。このため、養浜区域外のNo.5～No.7でも汀線の前進が見られる。一方、No.11にある突堤では東向きの漂砂が阻止されており、突堤の東側隣接区域では汀線後退が進んでいる。

図-4に示した湖浜縦断形の変化のうち、No.4～No.11の範囲の測量データより、1992年11月の縦断形を基準としてそれからの汀線変化量(Δy)と断面積変化量(ΔA)を求め、両者の相関を求めると、相関係数0.76で次の関係式が成立する。

$$\Delta A = 1.67 \Delta y \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ΔA と Δy の単位は m^2 と m である。両者の回帰係数は移動高に等しいから、この場合 $h=1.67m$ となる。次に前出の図-5よりNo.5～No.11の区間の前浜面積を求め、1994年3月からの変化量を算出した。さらに上述の移動高を乗じて湖浜土砂変化量をまとめたのが図-6である。これによると、1994年3～4月では、 $1,670 m^3$ とかなり多くの土砂損失が生じたが、4～10月では減少量は小さくなり、約 $244 m^3/月$ (年換算約 $2,928 m^3/yr$)となった。当初の養浜土砂量は $13,200 m^3$ であったから、1994年10月までに約24%の損失があったことになる。

守山なぎさ公園では、養浜後4回の深浅測量が行われてきている。ここでは1994年3月と6月の深浅図の比較により、守山なぎさ公園東端に伸ばされた突堤周辺の湖浜地形変化について調べてみる。深浅図を図-7に示す。

1994年3月と6月の深浅図の比較によると、突堤の西

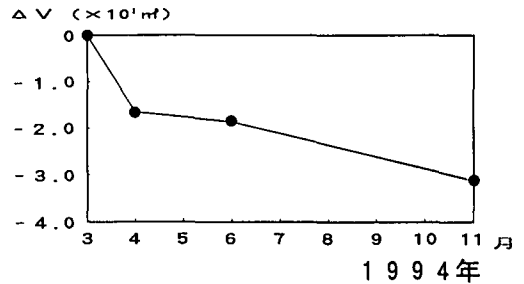


図-6 湖浜土砂変化量

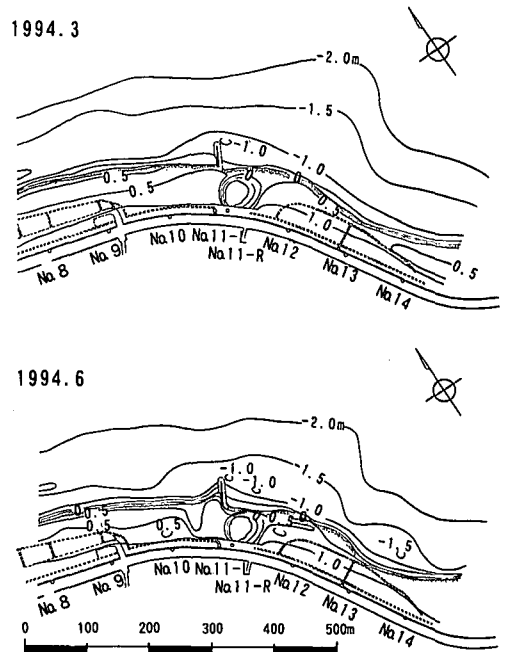


図-7 突堤周辺の湖浜地形変化図

表-1 バリアーの幅と波高水深比

	$B(m)$	$h_c(m)$	$h_r(m)$	B/H_0'	h_r/H_0'
バリアー①	10.8	1.03	0.53	26.3	1.29
バリアー②	10.0	0.98	0.48	24.2	1.17
バリアー③	11.7	0.90	0.40	28.5	0.98

(琵琶湖水位 B.S.L. -0.50 m, $H_0' = 0.41$ m)

側では 0.5 m より -1.0 m までの等深線が突堤近傍まで突出し、これと同時に突堤の東側でほぼ -1.0 m 以浅の等深線の後退が見られる。このことは、1994 年 3 月～6 月の間南東方向への沿岸漂砂が卓越したことを示す。また、その東側の No.12～No.13 付近では、汀線が弓状に前進し、さらにその東側の No.13～No.14 では汀線が局所的に後退している。No.13 には柳が成育しており、その根が湖に突き出ている。このため、あたかも No.13 に突堤があるかのようにして沿岸漂砂が阻止されたため上述の汀線変化が生じたと考えられる。

6. バリアー形成のモデル化

宇多ほか (1994 a) は、バリアーの形成に関する移動床模型実験を行い、沿岸漂砂により運ばれた砂が堆積してバリアーが形成されるには、砂の堆積空間が浅い海域であって、その浅海域の水深と換算沖波波高との比がほぼ 1.3 以下である必要があることを示した。また、バリアーの幅は換算沖波波高の約 20 倍であるとした。ここで、なぎさ公園の東西で観察されたバリアーについて検討してみる。写真-3 に示したバリアーを西 (写真中、右) 側よりバリアー①、②、そしてなぎさ公園東端の突堤東側のバリアーを③とする。バリアーの形成域の B.S.L. 基準での水深は図-4 より読みとれる。また、バリアーの幅はバリアー①、③については図-4 より、またバリアー②については空中写真から読みとれる。水深と幅をまとめると表-1 となる。さらに、なぎさ公園は図-1 に示すように北東方向のフェッチが長いので、彦根気象台の気象データのうち北東風の季節別出現頻度を調べると、春または秋に出現率が高い。そこで、これらの期間の代表風速として風速 10 m/s を設定して波浪推算を行うと、代表波高として 0.41 m が得られる。また、秋・春の琵琶湖水位は平均的に B.S.L. -0.5 m にあるから、これらの値より波高水深比を計算すると表-1 となる。これによれば、いずれの場合もその形成水深と換算沖波波高との比は 1.3 以下の条件をほぼ満足している。また、バリアーの幅と換算沖波波高の比はほぼ 25 程度であり仮定はほぼよいものと確認できる。

一方、測量データによれば、バリアーは沿岸漂砂によっ

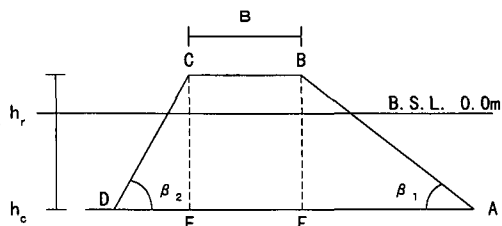


図-8 沿岸漂砂により形成されたバリアーの形状

て運ばれた土砂が堆積して形成されたこと、そしてその時のバリアー形状は、図-8 に示す変数により表される。バリアーの断面積は

$$\Delta S = B(h_r + h_c) + (h_r + h_c)^2 / 2 \cdot (1/\tan \beta_1 + 1/\tan \beta_2)$$

であって、守山なぎさ公園では $\Delta S = 20.4 \text{ m}^2$ となる。一方、バリアーへの土砂供給側では漂砂の移動高は $h_r + h_c$ で与えられるのでバリアーの長さを L_0 、周辺の土砂供給側の汀線長を L_0 とすれば、周辺域での汀線後退量は $\Delta S / ((h_r + h_c) \cdot L_0 / L_0)$ で与えられる。

7. ま と め

野洲川放水路の建設により、土砂流出のと絶えた旧野洲川南流の河口部では、近年汀線の後退が著しく、1973～1986 年で最大 130 m の汀線後退が生じた。そこで、失われた砂浜を復元するために、旧南流河口に隣接する守山なぎさ公園で $13,200 \text{ m}^3$ の土砂による養浜を実施した。養浜後土砂の一部は西側へ流出したが、養浜区域の西側にある密生した柳によるヘッドランド効果のため、沿岸方向への土砂流出はかなり抑制されていることが分かった。また、旧野洲川河口には、急速にバリアーが伸びたが、バリアーの形成水域と換算沖波波高との比は 1.3 以下の条件をほぼ満足しており、琵琶湖での観測結果と移動床実験の結果とがよい対応を示すことが分かった。またバリアーの形成に伴う周辺地域での汀線後退量を予測する式を誘導することができた。

参 考 文 献

- 宇多高明・山本幸次・永瀬恭一・五十嵐龍行 (1994a): バリアーの形成過程に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 551-555.
- 宇多高明・吉田隆昌・西島照毅・富士川洋一 (1994b): 植生を利用した湖浜保全に関する一考察—琵琶湖を例として—, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 1111-1115.
- 宇多高明・吉田隆昌・西島照毅・富士川洋一 (1995): 琵琶湖の野洲川放水路の開削に伴う旧河口周辺での湖浜変形, 地形, Vol. 16, pp. 157-176.
- 西島照毅・宇多高明・中辻崇浩 (1996): 琵琶湖湖浜におけるバリアーの発達と植生のヘッドランド効果, 第 51 回年講講演概要集, pp. 148-149.