

琵琶湖における試験養浜のモニタリング調査

MONITORING OF EXPERIMENTAL BEACH NOURISHMENT IN LAKE BIWA

杉村重憲¹・中辻崇浩²・宇多高明³

Shigenori SUGIMURA, Takahiro NAKATSUJI and Takaaki UDA

¹正会員 (独) 水資源機構琵琶湖開発総合管理所環境課 (〒110-0016 滋賀県大津市堅田2丁目1-10)

²正会員 (株) 建設技術研究所大阪本社環境システム部 (〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町1丁目6-7)

³正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-1 タカラビル)

Beach changes after the experimental beach nourishment using 2,540 m³ of fine sand were monitored on the lakeshore in Lake Biwa. The effect of the wooden groins to control littoral drift and the possibility of recycle use of sand were investigated. Three wooden groins were built to control sand transport. On the west side of the test area, natural sand with $d_{50}=0.39$ mm was accumulated, and a stable beach with a foreshore slope of 1/10 was formed. In contrast, nourished beach using sand of $d_{50}=0.16$ mm was eroded due to seaward sand transport, and sand deposited in the offshore bed, while forming a slope 1/20-1/25. To recover sandy beach, coarse material with $d_{50}=0.39$ mm is preferred, and to stop fine sand discharging, longer and impermeable groins are needed.

Key Words : Lake Biwa, beach nourishment, monitoring

1. まえがき

琵琶湖では1992年頃から湖岸侵食が顕著となり始め、対策の必要箇所が年々増加し、現在20カ所以上で対策が行われている。湖岸侵食の主な要因としては、治水対策などに伴う河川からの供給土砂量の減少や、湖岸域開発に伴う埋め立て、琵琶湖の水位操作など様々な要因が考えられている。こうした状況のもとで、豊かな自然を有し、かつ阪神圏の水源として重要な位置を占める琵琶湖の環境を良好に保つことは重要な課題である。琵琶湖における治水対策に関連する湖岸侵食の実例としては、河口付け替え工事に伴って生じた旧野洲川河口部での侵食¹⁾がある。旧野洲川では、放水路建設に伴って旧河道に河川水が流れなくなった結果、土砂流出が完全になくなり、沿岸漂砂とのバランスが失われて侵食が生じた。同様に、旧野洲川河口の東約5kmに位置する日野川河口においても著しい湖岸侵食が見られる。播磨²⁾は、1960年代以降の日野川河口域湖岸の変遷を空中写真の比較により調べ、河川改修の一環として行われた河口部掘削により河川流出土砂量が激減し、この結果河口部汀線が大きく後退したことを明らかにした。播磨らが明らかにした湖岸侵食のうち、とくに日野川河口右岸にあっては、

湖岸道路近傍まで侵食が進行し、道路前面にわずかに残されていた松林が消失寸前となった。このことから滋賀県と水資源機構は協力して対応策を検討することになり、2005年から委員会を立ち上げて検討を進めてきた。具体的には、突堤と養浜工を組み合わせた対策が提案されたが、養浜にはサンドリサイクルの観点から航路浚渫土砂の利用も検討することになった。この種の検討は、実海岸では以前より広く行われてきており、特に近年では投入砂の粒径によって砂の挙動が大きく変わることから、粒径を考慮しつつ土砂移動を予測するモデル(例えば、熊田ら⁴⁾)も提案され、実用に供されている。しかしながら、計算において仮定される砂の粒径に応じた平衡勾配の定め方についてはなお任意性が残されており、しかも海岸と波浪エネルギーが大きく異なる湖浜では、海岸で観察された現象がそのまま成立するとは限らない。これらの点より、湖浜における砂の粒径に応じた養浜の安定性の相違についての確認が必要である。このため、湖浜で現地実験を行い、養浜砂の移動状況をモニタリング調査によって調べた。本論文はこのモニタリング調査の結果について述べる。

2. 河口部汀線の長期的変遷と湖底地形

日野川は、**図-1**に示すように北湖東岸に位置し、主なフェッチはNが17.5km、NWが12.0kmである。日野川河口部湖岸の変遷について、播磨ら²⁾は湖岸線の変化を空中写真により明らかにした。本研究では、1973～2003年の空中写真より汀線位置を読み取り、それから日野川河口デルタの汀線変化を明らかにする（**図-2**参照）。

1973年には、日野川河口に大きく突出した河口デルタが形成されていた。1984年になると、1973年の湖岸線と比較して河口デルタの先端部では汀線が最大40m後退し、逆にデルタの幅が広がった。とくに河口左岸側での堆積が著しい。西部では、佐波江舟溜と防砂突堤が1979年に建設されたため、防砂突堤の東側では沿岸漂砂が阻止されて前浜が広がった。一方東部でも、1978年に野村舟溜の防波堤と防砂突堤が建設され、これによって東向きの沿岸漂砂が阻止されたため、突堤西側隣接部で前浜が広がりはじめた。

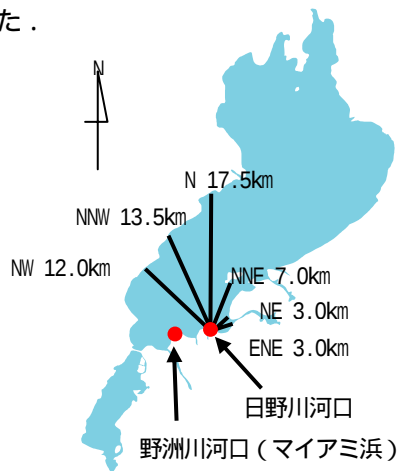


図-1 琵琶湖北湖における日野川河口の位置

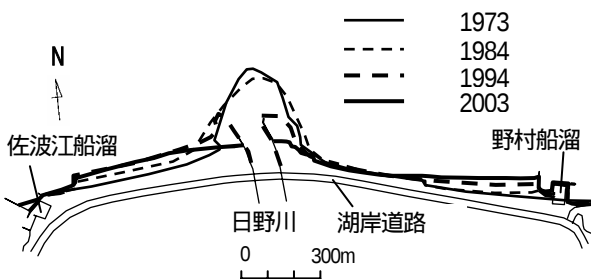


図-2 日野川河口部の汀線変化

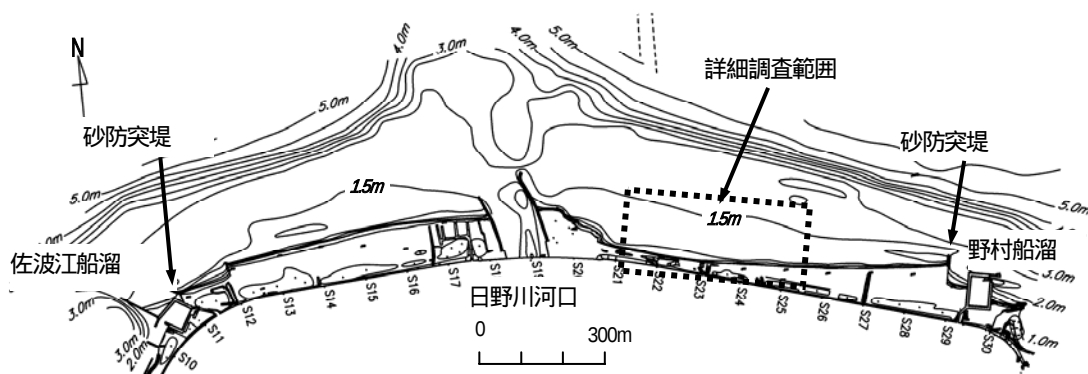


図-3 日野川河口部の深浅図（2004年測量）

1984年と1994年の比較では、河道掘削と河口沖掘削が行われ、大きく突出していた河口デルタの先端部が消失した。これと同時に、東西両方向への沿岸漂砂の流出が続いたために、河口部から両翼に運ばれた砂が防砂突堤によって阻止され、東西両側の湖浜で前浜が広がった。

この場合、河口西側の汀線は1984年当時とほぼ平行に前進し、西端の防砂突堤までの間でほぼ平行に汀線が前進している。防砂突堤の東側隣接部で汀線の方向角を測定するとN5°Wとなる。河口の東側区域にあっても東向きの沿岸漂砂によって運ばれた砂が堆積したが、野村舟溜に隣接する防砂突堤では、そこを境に三角形に前浜が広がりを示した。突堤近傍において汀線への法線を立ててその方向を調べるとN1°Eとなり、日野川河口デルタ左右岸ではほぼ安定状態にある汀線への方向角には6°の相違がある。

1994年と2003年の比較では、1994年以前には湖内へと大きく突出していた河口デルタはほぼ消失した。河口左岸にあっては西端の突堤までほぼ直線状の湖岸線となった。また西端の突堤を一部の沿岸漂砂が越えて流出したために、突堤の西150mにある別の防砂突堤の基部まで砂が堆積した。河口東部でも著しい地形変化が生じ、河口デルタ右岸が大きく侵食された。1984年までは河口デルタが大きく突出していたために、河口右岸では西側からの入射波が、一方河口左岸では東側からの入射波が遮蔽されることによって沿岸漂砂も小さかったが、河口デルタの突出部が消失したことにより河口両側の湖浜への波の作用強度が強まり、結果的に湖岸の変形が助長されたと考えられる。

図-3は2004年測量の日野川河口部の深浅図²⁾である。水深の基準はB.S.L.0m(T.P.84.371m)にある。日野川河口域では、地形的に見て湖浜にいくつかの特徴が見られる。第1に、前浜から-1.0mまでは急勾配で落ち込んだ後、-1m～-2.0mに非常に広い湖棚があることである。一方、沖合の-2.0m以深では再び湖底勾配が大きくなり、急傾斜で落ち込んでいる。また河口沖にある規模の大きな窪みは湖底掘削の跡である。また試験突堤を建設し、養浜後の湖浜変形について詳細モニタリング調査を行った区域を**図-3**に破線で示す。

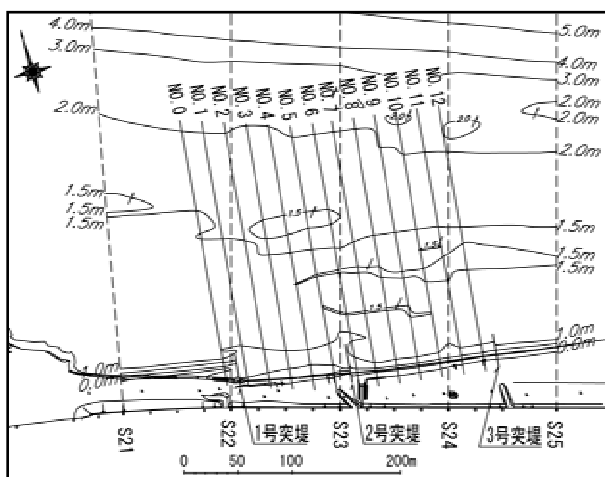


図-4 試験区域の測線配置と深浅図（2007年10月測量）

3. 試験養浜の概要と観測期間中の波浪と水位

試験養浜において設置した突堤の諸元と配置は、試験区域の東側に位置する野村舟溜に隣接する防砂突堤上手側での湖浜形状を参考に定めた。野村舟溜の西側では、図-3に示したように三角形状の前浜が形成され、長期的に安定している。この安定汀線への法線方向は $N1^\circ E$ であることから、図-4に示すように突堤はこの方向に伸ばし、また保全対象延長が400mであることから、対象区域に3基の突堤を設置し、その間で養浜を行って階段状の汀線を創出することとした。

養浜の平面計画は模式的に示すと図-5のようである。突堤は木杭列であり、西側から東側に1,2,3号堤とし、堤長は1,2号が30m、3号が25mとした。養浜区域は、1,2号突堤間と2,3号突堤間であり、1号突堤の西側では日野川河口方面からの沿岸漂砂により自然に湖浜が形成されるのを待つ方式とした。また1,2号突堤間では、全域で一様な養浜とする一方、2,3号突堤間ではある一箇所でのみ養浜を行い、周辺域への砂の供給は波の作用に任ず動的養浜手法³⁾を用いた。養浜は、2006年10月に行った。養浜土砂量は1,2号堤間では $2,140\text{m}^3$ 、2,3号堤間では 400m^3 である。1,2号堤間の養浜による前浜幅は、1,2号堤の付け根においてそれぞれ18mと22mであり、2号堤の付け根での前浜幅が4m広い。養浜における初期勾配は1/10を目標とした。養浜砂は航路浚渫土砂であり、2004年2月実施の粒度分析によると、粒径は図-6のようであり d_{50} は0.16mmである。なお、図-6には試験区域東端の測線S25付近で2004年2月に採取した現地砂の粒径分布も示すが、現地砂の d_{50} は0.39mmであり、これと比較すると養浜砂の粒径は細かい。このように養浜砂の安定性が自然状態と比べて相対的に低いという条件で試験養浜が行われた。試験施工区域では、図-4に示したように道路と直交する方向に測線（S21-S25）を配置した定期測量と、試験施工後の詳細測量を実施し、養浜後の地形変化を調べた。定期測量は測線間隔が100mで5測線、詳細測量は20m間隔で12測線である。

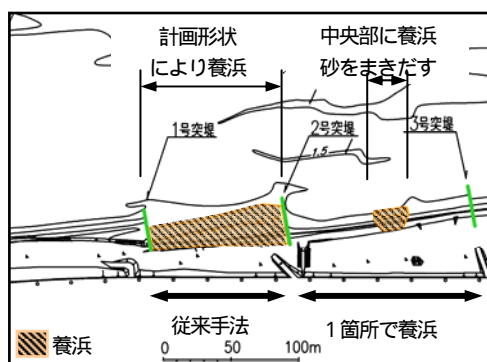


図-5 養浜の平面計画

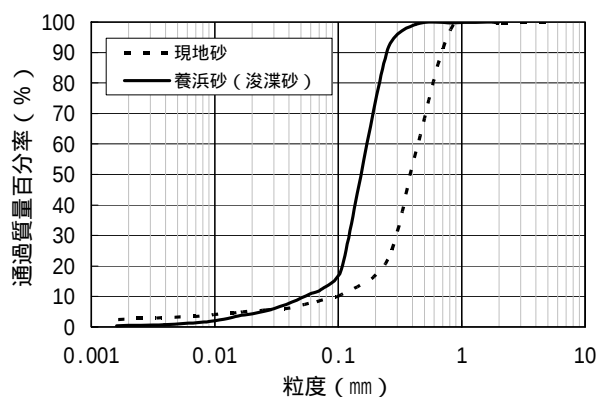


図-6 現地砂と養浜砂（浚渫砂）の粒度

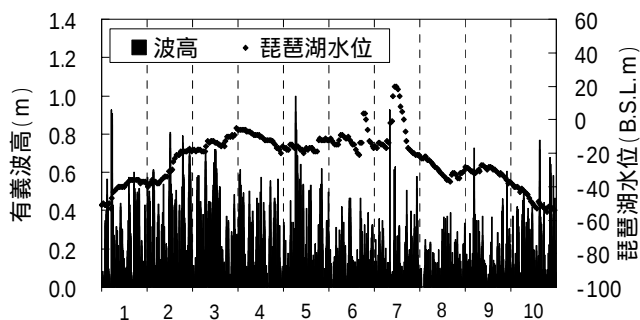


図-7 琵琶湖の水位変化と推算波高の時間変化

観測期間中の湖水位と、彦根気象観測所の風向風速データおよび当該地点における方向別の吹送距離をもとに、SMB法で推算した有義波高の時系列変化を図-7に示す。湖水位は、観測開始直後にはBSL-20cm(以下BSLは省略)前後であったが、7月16日には台風4号に伴う降雨により湖水位が急上昇し、+20cmに達した。またこの間で高波高が出現したのは5月10日の有義波高1.00mと、7月12日の0.93mである。

4. 深浅測量データの分析

(1) 試験区域の平面形状

図-4には2007年10月測量による深浅図も示す。養浜区域の沖合には水深1～2mの、勾配がほぼ1/200の緩勾配の海底面が広がっているが、水深3mより沖では勾配が1/25と、相対的に急になる。汀線付近の地形に注目すると、

1号突堤の東西で等深線位置にずれがあり、西側のほうが前進し、等深線が階段状となっている。このことは、当地においては東向きの沿岸漂砂が卓越し、この沿岸漂砂が1号突堤により阻止されていることを示す。これと同様な観点から2,3号突堤両側の等深線形状を調べると、0.0mの等深線は突堤があるにもかかわらず直線状である。これより、これら突堤の沿岸漂砂阻止能力は非常に小さく、沿岸漂砂は突堤部を自由に通過可能と推定される。

ここに、1号突堤と2,3号突堤とで沿岸漂砂の阻止能力に大きな違いが見られるが、これは1号突堤の上手側には粗砂が堆積したのに対し、2,3号突堤間では、浚渫土（細砂）が投入されており、これらの粒径の相違が変形過程に大きく影響したためと考えられる。

(2) 縦断形変化

図-8には、測線S22,23,24における縦断形変化を示す。1号突堤の西側に隣接する測線S22では、初期にはほぼ水深1mの平坦な湖底面であったが、日野川河口方面から運ばれてきた砂礫が堆積した結果、2007年2月までに高さがBSL+0.15mのバームが形成された。その後、2007年4月まで土砂量の増加が続き、バーム高は+0.36mと高まり湖浜が大きく広がった。このときの前浜勾配は1/10であった。その後10月では4月に形成されていたバームの湖側斜面が削られ、土砂が陸向きに運ばれてバーム高が+0.50mと一層高まった。

S22では大量の砂が堆積したのと逆に、S23では侵食が顕著である。1/10勾配の計画勾配は浜崖侵食が起きたことにより急勾配になっていく。浜崖はほぼ単調に後退しているが、S22で高いバームができた時期には陸側深く削り取られた。しかし浜崖形成に伴って供給された土砂の一部がのり先に堆積した結果、2005年3月当時の急深な縦断形が勾配1/20から1/25程度の相対的に緩い勾配に変わった。2,3号突堤間に位置する測線S24では浜崖は形成されず、前浜勾配は約1/8であり、また斜面ののり先にも砂が堆積している。

図-9は1号突堤西側の湖岸状況変化を示す。1号突堤は2006年10月に完成したが、完成と同時に旧日野川河口デルタの侵食に伴って供給された砂礫が東向きの沿岸漂砂によって運ばれ、突堤により阻止された結果、突堤西側に湖浜が形成された。4月26日では既にバームが形成され、5月10日には有義波高1.00mの波の作用を受けてバームが陸側にずれ、さらに7月には水位上昇と高波浪の作用によりバームの海側斜面が削られ砂が打ち上げられた。S22における縦断形変化はこのような変化を表している。

図-10には1号突堤東側の養浜区間の湖岸状況変化を示す。1,2号突堤間では天端高がBSL+1.0mと高い盛土が行われると同時に、養浜材の中央粒径が約0.16mmと細かな土砂が投入されたため、侵食の結果湖岸線に沿って浜崖が形成された。図-9では高波浪の作用の結果バームが陸側へずれる現象が見られたのと対照的に、1号突堤の東

側区間では浜崖の後退が進み、浜崖の沖には緩やかな斜面が形成された。

(3) 詳細測量データによる縦断形変化の比較

詳細測量データをもとに、1,2号突堤間における2007年4月～10月の変化について詳しく調べるために、図-11には測線No.1-No.5の縦断形変化をまとめて示す。縦断図は汀線付近の侵食域と堆積域の区別を付けている。

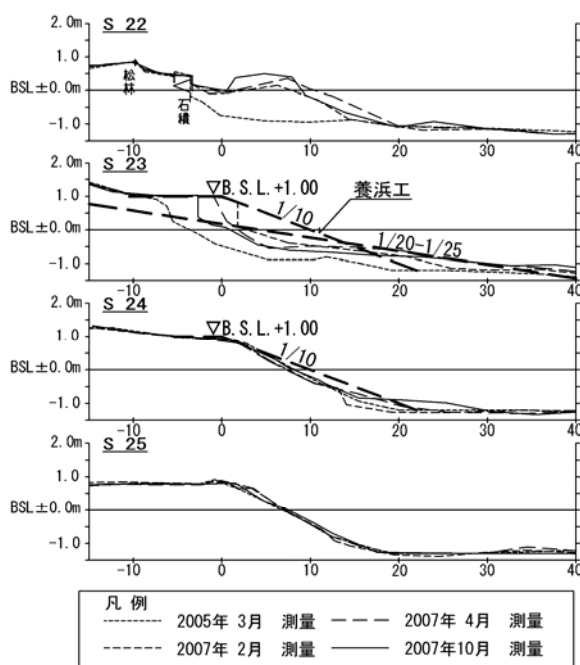


図-8 測線S22,23,24における湖浜縦断形の比較

(a) 4月26日 (-0.14m)



(b) 5月22日 (-0.17m)



(c) 7月23日 (-0.07m)



図-9 1号突堤から西向きに撮影した湖岸状況の変化

(a) 4月26日 (-0.14m)



(b) 5月22日 (-0.17m)



(c) 7月23日 (-0.07m)



図-10 1号突堤から東向きに撮影した湖岸状況の変化

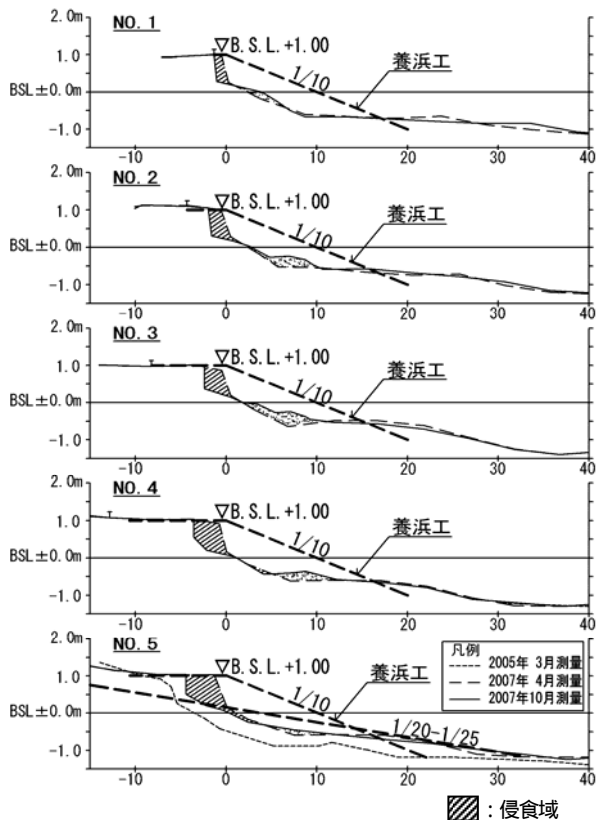


図-11 測線No.1-No.5の縦断形の比較

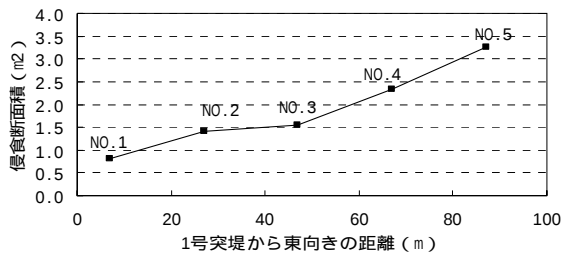


図-12 侵食断面積の沿岸方向変化

2007年4月から10月の間、侵食断面積は測線No.1からNo.5へと増加している。そこで横軸に1号突堤から東向きの距離を、縦軸に侵食断面積を取って図示したのが図-12である。侵食断面積は東向きに増大している。試験区域における沿岸漂砂の卓越方向は東向きである。したがって、突堤下手側で生じる一般的な侵食パターンから判断すれば、侵食断面積は1号突堤のすぐ下手で最大値を示すはずであるが、実測値はこれと逆である。この原因は、2号突堤が破損して沿岸漂砂が通過可能となっていたこと、また元々2号突堤側の前浜幅が1号突堤側より4m広がったことが関係している。すなわち、2号突堤の建設後養浜が行われたが、2号突堤を通過して沿岸漂砂が流出する条件のもとで、前浜幅が2号突堤近傍ほど大きかったことにより、汀線変化量も大きくなったと考えられる。

図-13は、2007年11月22日の2号突堤の破損状況である。写真に示す範囲には木杭列の隙間を埋めるための板柵があったが、それらは流出し木杭列間に隙間が見える。突



図-13 2号突堤の破損状況（2007年11月22日撮影）

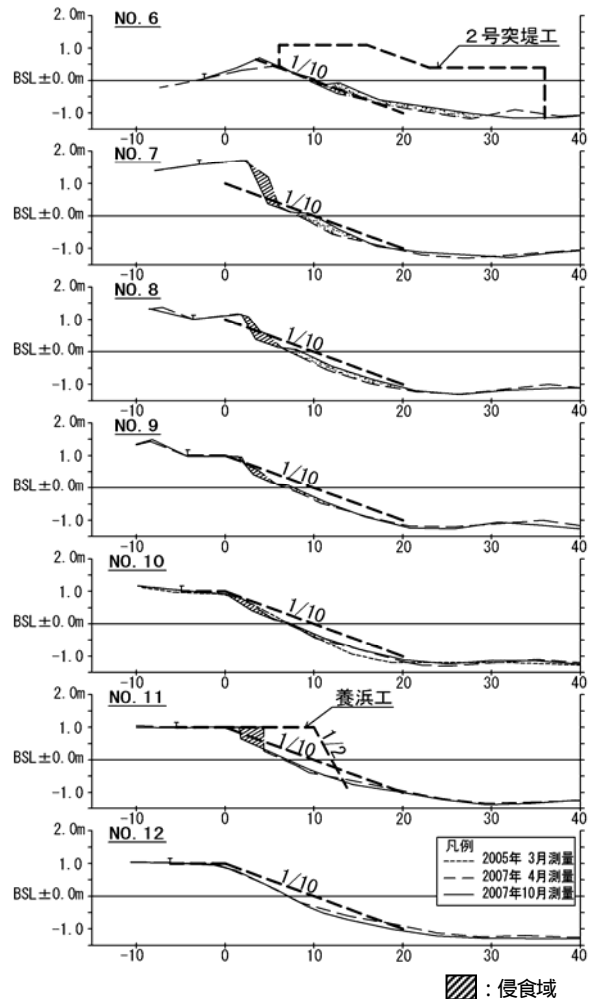


図-14 動的養浜の行われた2,3号突堤間の測線No.6-No.12の縦断形変化

堤の東側側面では西側と比較して水深が大きい。このため板柵の東側では大きな水面変動があり、それがスリットを通じて手前側に伝わる。この結果、スリットを通ずる往復流が発生し、しかも木杭列の両側で地盤高が違い、外側の方が低い。このため、木杭列突堤の内側に投入された細砂が流出したと推定できる。

図-14には、動的養浜の行われた2,3号突堤間の2007年4月から10月の変化として、測線No.6-No.12の縦断形変化を示す。この区間では測線No.11を中心として東西に15mの幅で養浜が行われた。2号突堤から東側に23.5m離

れた測線No.7では背後地盤が高かったため浜崖が1.3mと高いが、東側のNo.9へと侵食量が減少している。養浜が行われた測線No.11では浜崖侵食を伴いながら両側へと砂が供給されたが、浜崖の高さは時間経過とともに低くなっている。

5．沿岸漂砂量の推定

図-8より2005年3月を基準とした断面積の増加量と汀線（BSL0.0m）の変化量を求め、断面積変化量を汀線変化量で割ると漂砂の移動高が求められる。結果を表-1に示す。

測量時期により変動があるが、移動高の平均値は1.17mとなる。一方、図-8において、1号突堤の西側に形成された前浜（標高BSL0.0m以上の浜）の面積を求めると552m²となり、これに上記移動高を乗ずると、三角形の堆積域における砂礫の堆積量は646m³となる。大部分の砂礫の堆積は2005年3月から2007年2月までの間に起きたが、突堤は2006年10月に施工され、それより約1年が経過していることから、1号突堤の西側区域へ流れ込んだ沿岸漂砂量は646 m³/yrとなる。

宇多ら¹⁾は、旧野洲川北流河口の東側に位置するマイアミ浜において同様に突堤状の施設により沿岸漂砂が阻止されてきた時の湖浜形状より移動高を1.7mと推定し、沿岸漂砂量が平均で1,583m³/yrとなるとした。両者の比は0.41であって日野川河口が小さいが、日野川河口では湖浜縦断面形比較から漂砂の移動高を求めており、より精度が高い。このことから、移動高の比に応じてマイアミ浜での測定値を修正すると沿岸漂砂量は1,089m³/yrとなる。さらに、播磨ら²⁾は日野川河口を対象として検討を行い、航路浚渫や河川改修が行われ、供給土砂が減少した1984年頃から1994年までの湖岸域の侵食堆積を比較することによって、日野川河口右岸側における侵食面積が1.1x10⁴m²に対し、堆積面積は1.11x10⁴m²であるとした。これに移動高1.17mを乗じ経過年数10年で割ると、沿岸漂砂量はほぼ1,287m³/yrとなる。

以上のように、琵琶湖の旧野洲川河口右岸での沿岸漂砂量1,089m³/yrに対して、日野川河口では、播磨らの推定値1,287m³/yrと本研究での推定値646 m³/yrが得られたが、これらのうち、旧野洲川河口での推定値と播磨らによる日野川河口部での沿岸漂砂量はほぼ同程度の沿岸漂砂量であるが、本研究の算定値は播磨らの約1/2である。

表-1 測線S22の断面積と汀線変化量(2005年3月基準)

日 時	断面積 変化量 (m ²)	汀線 変化量 (m)	漂砂の 移動高 (m)
2007年 2月	12.1	11.4	1.06
4月	16.6	14.1	1.18
10月	16.1	12.6	1.28

播磨らの値は、河口デルタの変形が著しく、顕著な沿岸漂砂が生じていた時代の推定値であるのに対し、本研究の値は、日野川河口デルタが著しく侵食され、漂砂の供給量が減少した後の推定値であることが両者の主な相違と考えられる。したがって、現在では旧河口デルタから供給される沿岸漂砂量が、改修前の約1/2となったと考えられる。

6．まとめ

図-6に示したように、現地砂のd₅₀ = 0.39mmに対し、養浜砂のd₅₀は0.16mmであり、日野川河口方面から供給された土砂の粒径に比べて養浜砂の粒径は小さかった。湖浜の縦断面形変化から見ると、同一の湖水位・波浪条件のもとで、現地砂が堆積したS22ではバームの岸向き移動が起き、前浜勾配1/10で安定したのに対し、突堤下手側のS23では浜崖侵食時に砂の沖向き移動が起き、沖合に1/20～1/25勾配の比較的緩い海底面が形成された。これより今回の現地実験では、d₅₀ = 0.39mmの砂は岸向きに移動するが、d₅₀ = 0.16mmの細砂は沖向きに運ばれ、1/20～1/25と緩勾配で堆積することが分かった。従って、d₅₀ = 0.16mmの浚渫土砂を用いた場合、計画のように1/10勾配の砂浜は形成させることができない。1/10程度の前浜勾配の砂浜を創出するには、現地砂のd₅₀ = 0.39mmに相当する粗粒材が必要である。また今回の試験養浜では、1号突堤の上手側では日野川河口方面からの供給土砂が安定的に堆積したが、養浜区間では大部分の土砂の流出が起きた。1号突堤上手側の堆積土砂のd₅₀は0.39mmであったのに対し、養浜砂のd₅₀は0.16mmと細かかった。粒径が小さいと平衡勾配も小さくなるので、木杭列突堤により細砂の移動阻止を図るには、木杭列の隙間を完全に埋める方策を取ると同時に、突堤の長さを伸ばす必要があることもわかった。

参考文献

- 1) 宇多高明・吉田隆昌・西島照毅・富士川洋一：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.157-175, 1995.
- 2) 播磨光一・杉村重憲・宇多高明・中辻崇浩：琵琶湖に流入する日野川河口域の地形変化とその要因, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.421-426, 2005.
- 3) 宇多高明・石川仁憲：「実務者のための養浜マニュアル」, (財)土木研究センター, p.170, 2005.
- 4) 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄：卓越粒径集団に応じた平衡勾配を考慮した等深線・粒径変化モデル, 土木学会論文集B, Vol. 63, No.2, pp.154-167, 2007