

琵琶湖における湖水位の急上昇と波浪による湖岸変形

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

1. ま え が き

1994年の夏、琵琶湖では異常渇水にみまわれ、湖水位がB.S.L.-1.23 mと大きく低下した。その後、湖水位は回復傾向にあったが、1995年の4～5月の降雨により湖水位は一転して大きく上昇し、5月16日にはB.S.L.+0.93 mと著しい上昇を示した。この水位上昇と同時に、風浪が作用したため、過去には見られなかったような災害が生じた。近年各地の湖では、水資源の確保の意味より湖水位の人工調節が行われることが多いが、一方では湖の自然環境を保護することも求められており、とくに湖岸付近は陸性、水性の植物・動物の生息上重要な場所であることから、湖水位が上昇した場合、湖岸付近で生じる現象について十分な考慮が払われるべきである。このことから本研究では琵琶湖を実例として湖水位の急上昇と風浪による湖岸の変形について調べるものである。

一方、近年地球温暖化に伴う海面上昇が問題とされ、海面上昇時に海岸侵食や越波などが激化するとの報告がなされている。しかし海面の上昇量は現在はまだ小さいから、実証的な検討は不可能である。したがって現地海岸で生じる海面上昇時の影響を現地海岸で検討することはできないが、琵琶湖では今後 100 年間に生じると予想される海面上昇量 30~110 cm (IPCC WG, 1990) と同じ程度の 60 cm という水位上昇が生じたため、そのデータの分析は単に琵琶湖での水位変動に伴う影響を調べる上で役立つだけでなく、現地海岸での海面上昇時の影響予測の上でも有効と考えられる。このことより、湖水位が急上昇して湖岸の各地で各種災害が生じた後、約 1 か月後の 1995 年 6 月 24 日に湖岸の 17 地点で現地踏査を行った。ここではこの調査の結果をもとに考察する。

2. 琵琶湖の湖岸調査地点と湖水位の変化

本研究では、琵琶湖北湖を対象として1995年6月24日に湖岸状況の現地踏査を17箇所で行った。図-1には調査を行った17地点の位置を示す。調査地点は琵琶湖北

湖の湖西側に9点、湖東側に8点配置した。以下では図-1に①～⑩で示すように、琵琶湖北湖を時計回りに巡る順に特徴を述べる。琵琶湖の水位に関しては、観測時期に先立つ5月13日～20日に水位が著しく上昇し、5月16日にはB.S.L.+0.93 mと非常に高い水位となった(図-2参照)。通常、琵琶湖の水位は夏季に高く冬季に低いという季節変動特性を示すが、1994年9月の異常渇水による湖水位の低下後、上昇傾向を示したあと4、5月の降雨により湖水位は急上昇した。

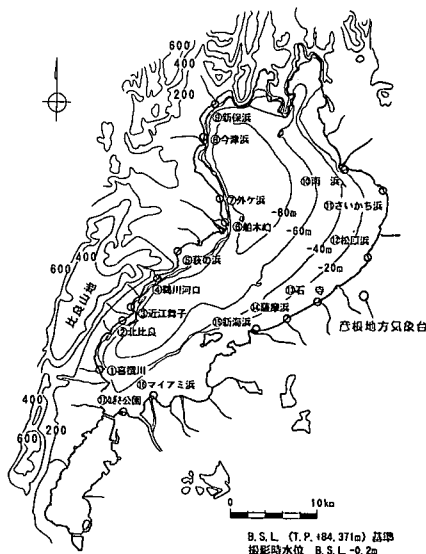
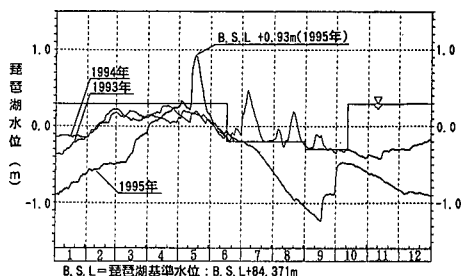


図-1 琵琶湖の湖岸状況調査位置



図一2 琵琶湖水位の経時変化

* 正会員 滋賀県土木部河港課

正會員 建設省土木研究所

*** 正会員 株式会社 建設技術研究所

3. 現地踏査による湖岸状況の調査（琵琶湖西岸）

琵琶湖西岸の9地点のうち、顕著な湖浜変形が観察されたのは、⑤萩の浜、⑥船木崎、⑦外ヶ浜、⑧今津浜の4地点であった。これらは琵琶湖北湖の中央以北に位置しており、④鵜川河口以南では著しい変状は見られなかった。以下では、南側から順に湖浜状況の観察結果について述べる。写真-1は⑤萩の浜での観察結果であり、湖浜に新たに形成されたバームである。バームの高さは約20 cmで、通常の波浪条件では全く波が到達することがない位置に大量の砂が堆積した。写真中央には突堤があり、その西(写真手前側)で1993年に養浜が行われた。その土砂が高水位時の波浪の作用により湖浜にうちあげられたのである。バームの陸側端において植生が砂に埋められていることから砂の堆積状況がよく分かる。写真-1の中央に見える突堤の天端高はB.S.L.+0.8 mで設計されており、今回の最高水位とほぼ同一であって湖水位に対する相対的天端高が減少したため、波や沿岸流が突堤を越えて流れ、この結果漂砂の一部が右岸側から左岸側へと流出しているのが見てとれる。このことは、湖(海)面上昇時、天端高が十分高くない突堤(ヘッドランド)ではそれを越えて漂砂が下手側へと流出してしまうことを表わしている。以上のように、もともと養浜により前浜の広がった萩の浜では、土砂が沖向きに流出するのではなく、波の作用により砂が岸向きに運ばれ、後浜上に大量に堆積することに特徴がある。

萩の浜の東北東約6 kmに位置する⑥船木崎でもレキの堆積が見られた。船木崎は安曇川の河口デルタの北側に位置し、湖岸線が大きく湖に突出した場所にある。そして図-1に示したように河口デルタが湖に大きく突出するために湖岸付近の勾配は1/8と急である。このため湖岸材料はレキを主とする。

写真-2は船木崎の北約3 kmに位置する外ヶ浜の状況である。図-1に示したように、琵琶湖北湖は安曇川河口の船木崎を境に湖岸線形状が大きく変わる。外ヶ浜は



写真-2 湖岸線沿いのボード上への土砂堆積（外ヶ浜）



写真-3 湖浜背後に形成された浜崖（浜分）

船木崎と異なり、南側は遮られている。ここでも萩の浜と同様、養浜された大量の砂レキが湖浜へうちあげられた。この結果、樹林内において湖岸線に沿って設置された遊歩道の上にまで砂レキが堆積した。この遊歩道の天端高はおおよそB.S.L.+0.8 mであり、通常の波浪の作用では考えられない位置に大量の土砂堆積が見られた。

外ヶ浜よりNNWの方向に7 km離れた今津浜でも変状が認められた。今津浜は石田川河口の北側に広がる砂浜であるが、河口の北側では柳などの生育する低湿地へと砂レキが侵入した。その北側で写真-3に示すように前浜背後の斜面に波が作用し、約2 mに達する浜崖が形成された。この浜崖がつい最近形成されたものであることは浜崖の下部に大量の植生が散乱していることから理解できる。

4. 現地踏査による湖岸状況の調査（琵琶湖東岸）

琵琶湖東岸では8箇所で行った。湖岸に変状が見られたのは⑩南浜、⑬石寺、⑭薩摩浜、⑮新海浜、⑯守山なぎさ公園の5箇所であった。最も北側に位置する南浜では、砂レキが岸側へうちあげられ、用水路を閉塞した。用水路の側溝の高さは通常の波浪の作用に対しては十分な高さを持っていたが、水位の上昇により高さが相対的に減少し、このような状況となった。南浜の南部では再び砂レキの堆積が生じた。



写真-1 湖浜に形成されたバーム（西岸、萩の浜）



写真-4 侵食された湖浜と露出した松の根 (石寺)



写真-6 造成した園地内で倒壊した松 (新海浜)



写真-5 護岸背後に形成された浜崖 (薩摩浜)



写真-7 土砂の打ち上げにより形成されたバーム

琵琶湖北湖のほぼ中央部に位置する石寺地区では湖岸線に沿ってみごとな樹林を形成していた松林の基部が侵食され、大量の松の根が波により洗い出された。写真-4に湖岸状況を示す。直径約 60 cm の松の根が露出している。写真-4 の前方で最も湖へ突出している松の根は、高さ約 1 m の浜崖が形成されたためその根の大半が露出してしまっており、この松が枯れるのもまもなくと考えられる。このような松が生育するには長い年月を必要とすることから、湖の環境保全の上からも重要な問題である。この地区の南側には今川の導流堤が伸びている。松の根が洗い出されているのは写真の手前側、すなわちこの不透過構造物に近い所であって、そこから距離が離れるにしたがい侵食の程度は減少する。このことは、写真-4に示す湖岸の侵食の要因は直接的には湖水位の上昇にあるものの、もう一つの要因は南西方向の沿岸漂砂の発達と、突堤状構造物による漂砂の阻止があげられる。

石寺の南西約 4 km に位置する薩摩浜では写真-5のように緩傾斜護岸の背後の土砂が波の作用で流出した。この場合も設計された高さ以上の水位上昇により護岸の背後にまで波が作用したことが問題であるが、ここでもその北側には用水路の導流堤があり、そこで沿岸漂砂が阻止されたことが侵食の主要原因となっている。

薩摩浜の西約 4 km の新海浜では愛知川の河口デルタとして突出した湖岸線を持っているが、近年河川流下土砂量の減少にともない河口部湖浜の侵食対策として突堤

2基が造られ、その間で養浜が行われた。養浜区間は十分広い前浜があったために、砂浜の変形はあったものも実質的な被害はなかった。しかしその下手側（東側）では浜崖侵食が進んだ。写真-6は公園に植栽された松がその下部の土壌が流出したため倒壊した状況を示す。写真のように、土壌は粘性土であったため、波の作用により容易に流出した。しかし写真-6より更に東側では浜崖の形成は部分的となり、この場合もまた、浜崖侵食の直接的原因は湖水位の上昇にあるが、もう一つは突堤による沿岸漂砂の阻止が関係している。

最後に、守山なぎさ公園で観察された前浜上への大量の土砂のうちあげである。約 40 cm ほどの高さのバームが樹木のすぐそばで形成された。この地区では前年に養浜が行われたが、標高が B.S.L.+0.8 m でほぼ水平に均された湖浜の土砂が岸向きに大きく移動したのである。

5. 波浪条件の検討

図-2に示したように、琵琶湖の水位は 1995 年 5 月 12 日より急上昇し、5 月 16 日にピークの B.S.L.+0.93 m に達したあとやや緩やかに減少し、5 月 25 日には急上昇以前の水位に戻った。いま、ピーク水位が 93 cm であったことを考慮し、水位の急上昇以前の水位と最大値とのほぼ 1/2 となる 70 cm を基準として、これを越えた水位となった日を調べると、5 月 13 日～5 月 20 日の 8 日間となる。この間の強風の方向は、3 タイプに分類される。

表-1 琵琶湖周辺 17 か所ごとに推算された波高

湖 浜 名	フェッチ (km)					有義波高・周期				
	W	WNW	N	ESE	SE	W	WNW	N	ESE	SE
①喜 撰 川			3.4	9.1				0.17	0.15	
								1.47	1.50	
②北 比 良				11.5	11.9			0.16	0.34	
								1.57	2.18	
③近 江 舞 子				12.2	13.1			0.16	0.35	
								1.59	2.23	
④鶴 川 河 口				13.5	12.0			0.17	0.34	
								1.62	2.18	
⑤萩 の 浜				16.2	13.2			0.17	0.35	
								1.68	2.23	
⑥船 木 崎			15.0	16.0				0.29	0.17	
								2.08	1.67	
⑦外 ケ 浜			7.7	21.0	19.8			0.23	0.19	0.40
								1.79	1.76	2.44
⑧今 津 浜				22.8	22.8			0.19	0.42	
								1.79	2.51	
⑨新 保 浜				17.0	25.8			0.18	0.44	
								1.69	2.58	
⑩南 浜					6.7				0.27	
									1.90	
⑪さい かい 浜	19.0	22.5				0.47	0.53			
						2.58	2.75			
⑫松 原 浜	22.2	18.8	10.5			0.49	0.49	0.26		
						2.67	2.64	1.92		
⑬石 寺	19.0	15.3	29.0			0.47	0.46	0.36		
						2.58	2.52	2.38		
⑭薩 摩 浜	17.8	13.8	28.4			0.46	0.44	0.35		
						2.54	2.46	2.37		
⑮新 海 浜		13.2	30.6			0.43	0.36			
						2.43	2.40			
⑯マイ ア ミ 浜			14.2					0.29		
								2.06		
⑰守山なぎさ公園		3.0	11.0			0.24	0.26			
						1.67	1.94			

注) 上段: 有義波高 (m)
下段: 周 期 (s)

第1は、WNWあるいはW方向、すなわち湖東側で問題となる風である。第2は、SEまたはESE方向、すなわち湖西側で問題となる風である。そして第3はN方向である。この風は湖西側には陸風となって問題がないが、湖東側ではとくに南部を中心として高波浪をひき起こしたと考えられる。

以上の5つの風向 (W, WNW, N, ESE, SE) のそれぞれの風向において観測された最大風速を与えると、Willsonの方法により波浪推算が可能である。そこで今回の全調査地点において、これら5風向のフェッチを読みとり、各方向別に推算を行うと、表-1となる。表-1では有義波高・周期を各箇所ごとに整理してある。また表中、各地点ごとの最大波浪をハッチで示した。これによると、湖西の①～④地点のうち②～④地点ではSE方向において約0.35 mの波高が発生したが、①地点では波高は低い。一方、⑤～⑧の地区ではSE, ESE方向からの波の作用を強く受けたことがわかる。湖東側ではNだけでなくWまたはWNW方向の風の両者を受けたため、高波浪が発達した。以上のように、8日間にほぼ3方向からの風が吹いたため湖西・湖東の各地で被害が発生したこと

が分かる。

6. 考 察

前節で述べた琵琶湖の各地先での湖岸変形は、図-3に要約される。タイプAは、後浜への大量の土砂堆積が生じるものであり、これに属する実例は6箇所と最も多い。土砂堆積により、用水路の閉塞や遊歩道の通行不可能などが生じる。また湖岸の低湿地への砂レキの侵入により湖浜の植生環境の急変をもたらす。タイプA'はタイプAとよく似ているが、岸向き漂砂ではなく沿岸漂砂を対象としている点が異なる。突堤状の漂砂阻止構造物の高さが低いために堆積した土砂が沿岸方向に流出するものである。タイプBは、波の作用により、シルトなどの粘性土でできた湖岸から土砂が流出するものである。この例はタイプAについて多く観察された。しかも、このタイプでは沿岸漂砂の上手側に漂砂を阻止する各種構造物が存在するときに著しく浜崖侵食が生じることが特徴である。タイプB'はタイプBと同様に浜崖侵食が進むものであるが、浜崖の前面に設置された護岸の天端高が低いことに起因することに特徴がある。

宇多・小俣 (1991) は、海水面の上昇時の問題を取りまとめた。その中で、海岸侵食の助長機構として、2つのケースを指摘した。第1は、図-4のように海水面が上昇し、波のうちあげ高が増大することにより、いままでも波の作用を受けずにいた区域に波が作用し、その部分の細粒分、とくにシルト分が急速に沖合へと流出することである。沖合へ流出した土砂は広い範囲に拡散し、海底面に薄く堆積する。したがって砂浜におけるバーの形成のように、沖合の水深が減少することによる海浜の安定化機構は働かない。第2は、図-5のように現海水面条件で波に対して安定した形状を持つ砂浜汀線に対して、後浜以高の陸域のコンターが汀線と平行でない場合生じる変形である。水位上昇後の汀線は現況汀線と平行となる

タイプ	特 徴	模 式 図	実 例
A	湖浜への土砂堆積 (バームの形成)		⑤、⑥、⑦ ⑧、⑩、⑪
A'	突堤を越えた 土砂流出		⑤
B	浜 崖 侵 食 (天然湖岸)		⑥、⑧、⑪ ⑮
B'	浜 崖 侵 食 (護岸背後)		⑭

図-3 湖岸変形タイプ分類

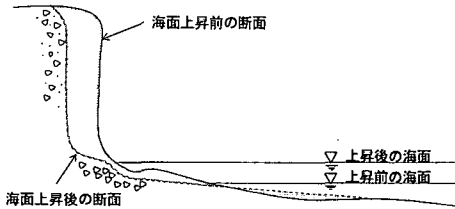
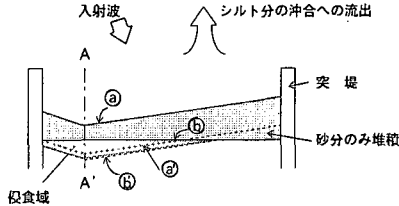


図-4 未固結の海食崖やシルト質の浜崖パターン



- ① 海面上昇前の汀線
- ② 海面上昇後の汀線
- ③ 海面上昇前の陸域代表コンター
- ④ 海面上昇後の陸域代表コンター

図-5 突堤間での汀線変化の状況

ように変形するので、漂砂の上手側では汀線が後退し、下手側に堆積する。この場合、陸域が細粒のシルト質でできておれば、図-5のA-A'断面では図-4と同様な断面変化が起こり、しかも下手方向に運ばれた土砂の大部分は下手側の突堤（ヘッドランド）の上手側に堆積せず、沖に流出してしまい、海浜の安定化に役立たない。今回の琵琶湖での湖水位の急上昇時に見られた侵食は、第2のケースに該当する。

一方、今回明らかになった点として、砂レキでできた湖浜では岸向きに土砂が移動し、高いバームが形成される点である。これはとくに養浜などにより湖浜に十分な砂がある時に生じる。Bruun (1962) は水位が高いと冲向きに土砂が流出して侵食が激化するとした。また、三村ほか (1993) は Bruun 則をもとに海浜面積の消失について定量的な予測計算を行った。しかしながら、琵琶湖での湖岸の変形によれば、そのような条件は常に起こるわけではないと言える。これは次のようにして説明される。

堀川ほか (1973) は、波による海浜変形に関して岸向き冲向き漂砂による海浜変形の分類式を提案した。海浜変形は次式により3タイプ (I, II, III) に分類される。

$$H_0/L_0 = C(\tan \beta)^{-0.27} \cdot (d/L_0)^{0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_0 : 沖波波高、 L_0 : 沖波波長、 $\tan \beta$: 海底勾配、 d : 砂の粒径、 C : 定数である。式 (1) においてタイプ III は、浅海部の土砂が岸向き漂砂により運ばれ、汀線にバームを形成するものであり、 $C < 3$ を満足する条件で起こる。いま、バームの形成が顕著に見られたケースのうち、養浜が行われ、しかも高波浪の作用した⑤萩の浜と⑦外ヶ浜において、湖岸の底質、海底勾配条件として $d = 0.93 \text{ mm}$, 1.05 mm , $\tan \beta = 1/18$, $1/25$ において C 値を計算すると、それぞれ $C = 0.09$, 0.08 となり、これらの値は確かに $C < 3$ を満足している。このことから、琵琶湖では波浪条件と粒径との関係より岸向き漂砂が卓越してバームが形成されたと考えられる。

一方、粒径が非常に小さく、粘性土など波の作用のもとで容易に浮遊・流出する成分から湖（海）岸がなるときは冲向き漂砂が著しくなる。その場合、単に冲向きに移動するのみではなく、図-5に示した沿岸漂砂移動と複合した移動が生じると考えられる。以上より、湖（海）水位の上昇時における波による湖（海）浜の縦断変形は、常に Bruun 則によると考えるのは誤りであり、湖（海）浜の粒径の効果を取り込むべきことを示している。

7. あとがき

琵琶湖における水位の急上昇時の湖岸変形について考察した。琵琶湖では現地海岸と比較して波高は低く、周期も短いから、湖岸で生じた2種類の現象と同じ現象がただちに現地海岸で生じると結論することはできない。しかし、2種類のうち沿岸漂砂の阻止構造物の下手側において生じる現象は波浪の大小にかかわらず普遍的性質を有することから、現地海岸においても十分な注意が必要と考える。また、Bruun 則の限界も明らかであるので、今後それらについて検討したいと考えている。

参考文献

- 宇多高明・小俣 篤 (1991): 海岸保全に及ぼす海面上昇の影響, 土木技術資料, Vol. 33, No. 3, pp. 62-65.
- 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.
- 三村信男・幾世橋 慎・井上啓子 (1993): 砂浜に対する海面上昇の影響評価, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1046-1050.
- Bruun, P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. Waterways and Harbors Div. ASCE, 88 (WW1), pp. 117-130.
- IPCC WG1 (1990): Climate Change—The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, 365 p.