

琵琶湖湖辺域における湖岸保全施設によらない湖岸管理の実現可能性に関する一考察

A study on feasibility of Lake Biwa shore management not dependent on shore-based conservation facilities

研究第一部 主任研究員 瀧 健太郎
 研究第一部 次 長 児玉 好史
 研究第一部 主任研究員 都築 隆禎
 (株)建設技術研究所 伊藤 禎和
 いであ株式会社 加藤 陽平

琵琶湖では平成4年頃から湖岸の侵食災害が頻発するようになり、滋賀県では面的防護（突堤、養浜、緩傾斜護岸の3点セット）を基本とした湖岸保全施設を整備してきた。しかし、湖岸保全対策が実施された箇所では侵食を防ぐ効果はある一方で、汀線が鋸状に安定することによる景観の悪化や生態系への影響が懸念されるようになり、湖岸保全施設によらない湖岸管理が望まれている。これまで、湖岸形状に変化を与える要因として、琵琶湖の水位変動パターンや河川からの供給土砂量の変化などが指摘されてきたが、これらが具体的にどれ程の影響を及ぼすのか明確にされていなかった。

そこで本研究では、山地から河川、湖岸域（流砂系から漂砂系）に至るまでの一連の土砂移動を追跡できる数値解析モデルを構築し、各要因が湖岸形状に与える影響を定量的に評価することを試みた。さらに構築した数値解析モデルを用いて、湖岸保全施設によらない湖岸管理の可能性を探り、①流入河川河口部の堆積土砂をバイパスし沿岸漂砂として供給すること、②琵琶湖水位をB.S.L.+0.3m以下で管理することができれば、湖岸保全施設なしでも動的平衡状態あるいは堆積傾向とすることが可能であることが確認できた。

キーワード：湖岸侵食、汀線、水位変動、供給土砂量、流砂系、漂砂系、動的平衡状態

Rapid shore erosion of Lake Biwa began to occur frequently around 1992, and the Shiga Prefectural Government has been working on the development of lakeshore conservation facilities designed basically for integrated shore protection (a combination of jetties, beach nourishment and gentle-slope revetments). However, although lakeshore conservation measures are effective in preventing erosion only in the areas where they have been implemented, there is concern about landscape degradation and adverse effects on the ecosystem caused when the shoreline is stabilized in a saw-toothed shape. There is a need, therefore, for lakeshore management that does not depend on lakeshore conservation facilities. It has been pointed out that patterns of water level changes and changes in sediment supply from rivers are factors causing changes in Lake Biwa's shore configuration, the degree to which these factors affect lakeshore configuration has not yet been elucidated.

In this study, a numerical analysis model capable of keeping track of the sediment transport process from mountains to rivers and lakeshore areas (from a sediment flow system to a littoral drift system) was developed to quantitatively evaluate the effect of each factor on lakeshore configuration. The newly developed numerical analysis model was also used to explore possibilities of lakeshore management that is not dependent on lakeshore conservation facilities. As a result, it was found that a dynamic equilibrium state or a deposition tendency achieved by (1) supplying the sediment deposited at the mouths of tributary rivers by bypassing it in the form of littoral drift and (2) keeping the water level of Lake Biwa at or below BSL+0.3m (BSL=Biwako Surface Level: reference water level of Lake Biwa).

Key words : lakeshore erosion, shoreline, water level fluctuation, the rate of sediment supply, sediment flow system, littoral drift system, the state of dynamic equilibrium

1. はじめに ～研究の背景～

琵琶湖では平成4年頃から湖岸の侵食災害が頻発するようになり、滋賀県では面的防護（突堤、養浜、緩傾斜護岸の3点セット）を基本とした湖岸保全施設の整備による対策を講じてきた。しかし、湖岸保全施設は侵食を防ぐ効果がある一方で、汀線を鋸状に安定させるため、景観の悪化が指摘されている。さらに最近では、湖岸保全施設により砂の動きが制限されることで、砂浜が攪乱されにくくなり、陸域性の植生が波打ち際近くまで進出したとの指摘もある。

これまで、湖岸形状を変化させる要因として、琵琶湖の水位変動、流入河川からの供給土砂量の変化、湖岸構造物による影響などが指摘されてきたが、これらが具体的にどれ程の影響を及ぼすのか明確にされてこなかった。

そこで本研究では、まず、水位変動パターンや供給土砂量の変化、湖岸保全施設の有無などによる湖岸形状の応答を再現できる数値解析モデルを構築し、湖岸侵食の要因を定量的に把握することを試みる。さらにその結果を踏まえ、湖岸保全施設による対症療法的な湖岸管理に変わり、湖岸保全施設によらない湖岸管理の可能性を探る。以下にその概要を報告する。

2. 琵琶湖湖岸の現状

2-1 湖岸形状の変遷

琵琶湖北湖における昭和59年から平成15年までの汀線変化の状況を次頁図-1に示す。これは、昭和59年から平成3年までの8年間と平成3年から平成15年までの13年間の汀線変化を航空写真から100mピッチで汀線の前進後退を判読し整理したものである。なお、過去の航空写真のうち、昭和59年のものがカラーで比較的鮮明であること、平成15年の写真が最新であることから、この間の変遷を比較することとした。また、現行の琵琶湖水位管理の影響を把握するため、水位操作規則の運用開始時期に最も近い年代で航空写真が存在する平成3年を中間年とした。さらに、沿岸漂砂の卓越方向、平成3年及び平成15年当時の河川改修に伴う河口掘削の有無、湖岸状況（人工湖岸・ヨシ帯等の区分）、湖岸保全施設の有無なども合わせて、図-1に示す。

(1) 全体的な傾向

ここで図-1を作成したデータを用いて、汀線の前進量と後退量を北湖全体で合計してみる（図-2）。ここから、北湖全体としては、平成3年以前は侵食傾向にあるが、平成3年以降はやや堆積傾向に転じていることが分かる。

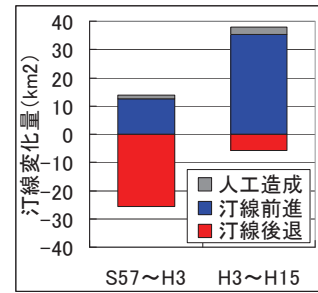


図-2 琵琶湖北湖の汀線変化量

(2) 流入河川の河口周辺での傾向

大きな汀線後退が河口掘削を実施した箇所周辺で多く見られる（図-1 赤破線）。例えば、平成2年以降に河道掘削をした日野川（写真-1）や犬上川の河口周辺では、平成3年以降に大きく汀線が後退している。



写真-1 日野川河口周辺での汀線変化

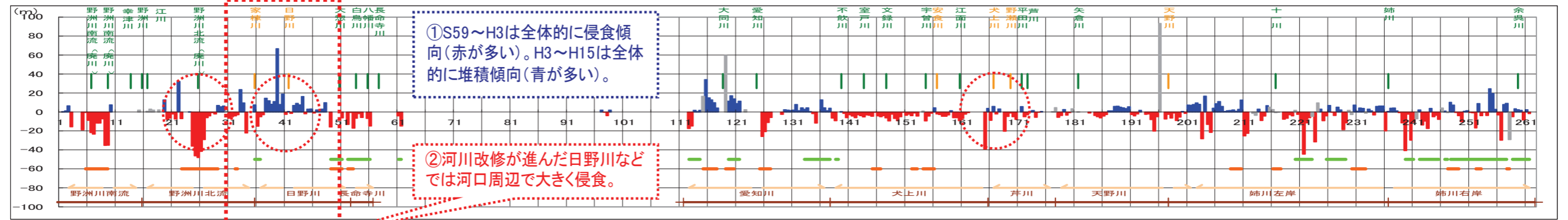
(3) 湖岸保全施設周辺での傾向

図-1（次頁）で平成3年以降の宇曾川河口周辺の汀線変化を見ると、湖岸保全施設（突堤及び養浜）が整備された箇所では、沿岸漂砂の方向から見て、施設の手側で汀線が後退し、施設の上手側で汀線が前進しており、鋸型の地形となっていることが分かる。

ここまでに、湖岸保全施設（突堤・養浜等）は、全体としてはやや堆積傾向に転じさせたものの、不自然な鋸型の汀線形状を作り出していること、河口掘削に伴い大規模な侵食が生じやすいことが分かった。

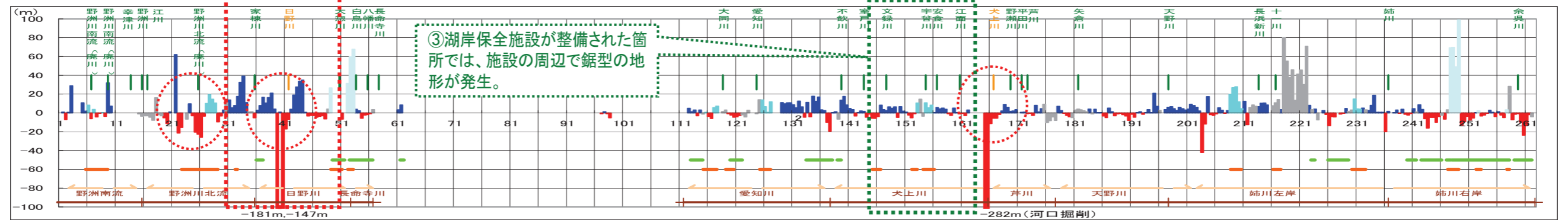
琵琶湖北湖東岸

汀線変化 S59~H3



昭和59年から平成3年の汀線変化量（北湖東岸）

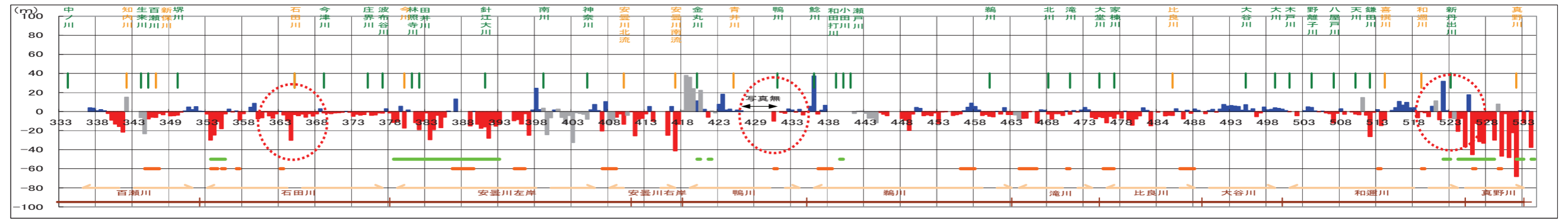
汀線変化 H3~H15



平成3年から平成15年の汀線変化量（北湖東岸）

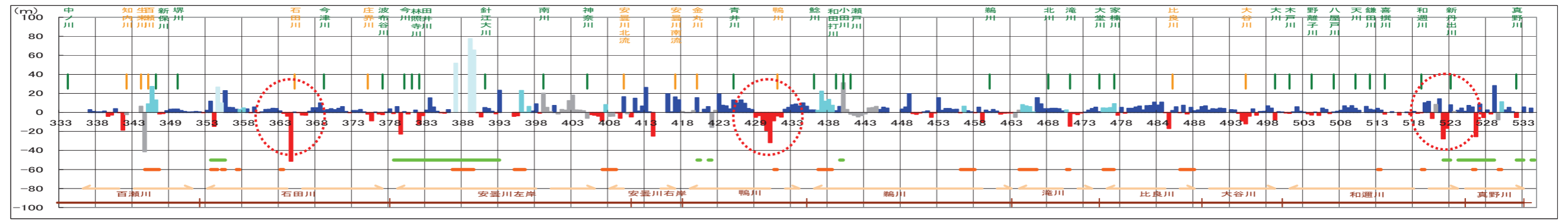
琵琶湖北湖西岸

汀線変化 S59~H3



昭和59年から平成3年の汀線変化量（北湖西岸）

汀線変化 H3~H15



平成3年から平成15年の汀線変化量（北湖西岸）

※ 昭和59年から平成3年までの8年間と平成3年から平成15年までの13年間の汀線の変化を航空写真から判読した。過去の航空写真のうち、昭和59年の写真がカラーで比較的鮮明であることと、平成15年の写真が最新であることから汀線の比較にはこれらを使用した。また、現行の琵琶湖水位管理の影響を把握するため、水位操作規則の運用開始時期に最も近い年代で航空写真が存在する平成3年を中間年とした。

- 汀線前進
- 汀線後退
- 人工湖岸
- 砂浜保全・再生実施箇所
- ヨシ原保全・再生実施箇所
- 河口部掘削
- 河口部掘削なし
- 植生帯湖岸
- 湖岸保全対策箇所
- 漂砂の流れ

図-1 琵琶湖（北湖）汀線の変遷

2-2 琵琶湖水位と湖岸侵食の関係

前節で、平成3年から平成15年では北湖が全体的に堆積傾向であると示されたが、しかし一方で平成4年以降、侵食災害(局所的な侵食が短時間に進行するケース)が急増している。また、侵食災害の多くは、一年のうちで琵琶湖水位が比較的高い3月から5月に集中している(図-3)。

ここで、平成3年から12までのデータを用いて、琵琶湖水位と彦根地方気象台の時間平均風速(日最大値)の分布図を作成し、さらに侵食災害が発生した日のデータを黄色に着色し、発生傾向を確認した(図-4)。

図-6から、琵琶湖水位がB.S.L.(琵琶湖基準水位)+0.3mを超えるか、時間平均風速が10m/sを超える場合に、侵食災害が集中していることが分かる。

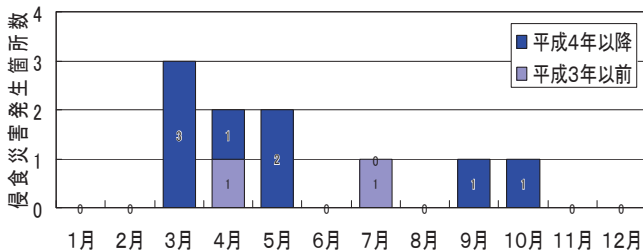


図-3 侵食災害の発生傾向

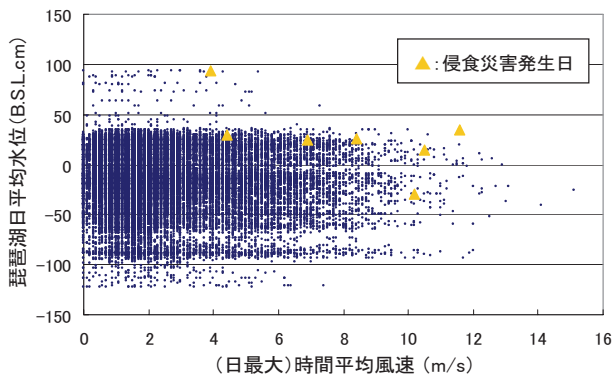


図-4 侵食災害の発生条件(琵琶湖水位と風速)

3. 湖岸侵食解析モデルの構築

3-1 モデルの概要

ここで、湖岸保全施設の有無、河口掘削、琵琶湖水位などが湖岸形状に影響を与えている影響を定量的に評価するため、野洲川流域の流砂-漂砂系を対象に、数値解析モデルを構築した。

このモデルは、山地~河道域、河口域、湖岸域の3モデルで構成している。まず、山地~河道域モデルは、山林の荒廃の程度、ダムや砂防堰堤などの横断工作物、河川改修、アーマーコート等が河川の流下土砂量に与える影響を評価する。次に、河口域モデルは、上流か

らの供給土砂量、琵琶湖水位、河口形状などから、河口砂州の形状変化と琵琶湖への土砂到達量、すなわち沿岸漂砂の供給量を評価する。最後に、湖岸域モデルは、湖岸保全施設の有無、琵琶湖水位、沿岸漂砂量が湖岸形状に与える影響を評価する。そして、上流側から下流側のモデルに粒径ごとの土砂フラックスを受け渡すことにより、流砂系から漂砂系までを統合的に評価する。今回は紙面の都合上、湖岸域モデルの概要と評価結果についてのみ詳述することとする。



図-5 解析モデルの適用範囲

3-2 湖岸域モデル

(1) モデルの概要

湖岸域モデルは、混合粒径を考慮した等深線変化モデルを採用した。これは、芹沢ら¹⁾により提案された海浜横断形の安定化機構を導入し、岸沖方向の漂砂の移動を考慮している。また、熊田ら²⁾による粒度組成に応じた平衡勾配の概念を適用し、混合粒径での再現実計算を可能としている。

以下に本モデルの基礎式を示す。

$$q_x = \varepsilon_z(z) \cdot K_x \cdot (EC_g)_b \cos \alpha_b \sin \alpha_b$$

$$q_z = \varepsilon_z(z) \cdot K_z \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \sin \beta_c \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right)$$

ここに、

q_x : 沿岸漂砂量 (m^3/s)、 q_z : 岸沖漂砂量 (m^3/s)

$\varepsilon_z(z)$: 漂砂量の水深方向分布

K_x および K_z : 漂砂量係数 (m/N)

$(EC_g)_b$: 波エネルギー逸散量 ($N \cdot m^2/s$)

α_b : 等深線に対する波向角 (rad)

β_c : 安定勾配角 (rad)、 β : 断面勾配 (rad)

(2) 計算条件

今回は、旧野洲川北流河口部周辺(図-6)での解析結果について紹介する。詳しい計算条件を表-1に示しておく。なお、この箇所では、平成4年以降に湖

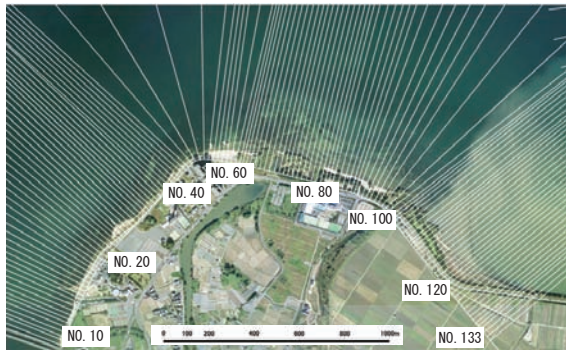


図-6 計算範囲(旧野洲川北流河口部周辺)

表-1 計算条件(旧野洲川北流河口部周辺)

項目	計算条件(初期値等)			
解析対象範囲	沿岸方向	L=3.0km		
	岸沖方向	L=約500m		
解析サイズ	ΔX: 20mピッチ、ΔZ: 0.5m、			
初期地形	平成4年深淺測量より作成			
計算期間	平成3年~平成15年の12カ年			
入射波の条件	琵琶湖湖心の風向・風速観測地をもとに有義波法により季節別のエネルギー平均波高を設定			
	季節	月	波高Hb(m)	周期T(sec)
	冬季	1~3	0.26	1.52
	春季	4~6	0.18	1.23
	夏季	7~9	0.19	1.21
秋季	10~12	0.25	1.37	
粒径・平衡勾配	平成6年底質材料調査(滋賀県河港課資料)			
河口流出土砂量	なし			
浚渫・投入土砂量	工法	設置場所	延長(m)	実施年度
	養浜	No. 85~No. 107	452	1994年8月
	養浜	No. 44~No. 51	146	1999年10月
構造物	導流堤	No. 10	15	-
	導流堤	No. 35	70	-
	突堤	9基	-	-
	護岸	No. 7~No. 41	606	-
	護岸	No. 51~No. 61	194	-
護岸	No. 131~No. 134	60	-	

岸侵食が深刻化し、河川管理者(滋賀県)により湖岸保全施設が整備されている。

(3) 再現性の確認

構築したモデルを用いて、平成3年から平成15年までの湖岸形状の変化量を計算した。再現性を確認するため、航空写真から実測した汀線変化量と計算値とを比較することとした。航空写真は平成6年、12年、15年のものが存在するため、この3つの年度で比較した。

その結果、部分的に再現できない箇所もあったが、侵食・堆積の傾向については、十分把握できるレベルの再現性を確認することができた。比較結果のうち、平成15年のデータを図-7に示す。

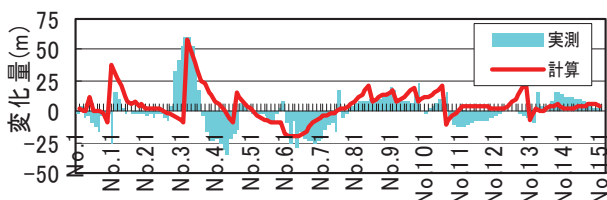


図-7 再現結果(H3-H15,等深線B.S.L.+0.0m)

4. 解析モデルによる湖岸保全施設の影響評価

4-1 計算条件

構築した湖岸域モデルを用いて、突堤などの湖岸保全施設の有無が湖岸形状に与える影響を予測した。計算期間は、実測地形がある平成4年から平成24年までの20年間とした。琵琶湖水位、供給土砂量、波浪などの計算条件を表-2に示す。なお、表中の春夏秋冬は、それぞれ4-6月、7-9月、10-12月、1-3月としている。

また、琵琶湖の水位変動パターンが湖岸形状に与える長期的な影響を確認するため、図-8に示すような3つの水位変動パターンを作成し計算を実行した(計算上は、ひとつの水位変動パターンを計算期間中繰り返し与える)。以下にケース毎の考え方を示す。

ケース① 水位操作規則制定以前の平均的な水位変動。昭和57年から平成3年までの琵琶湖平均日水位の同日平均をとったパターン。

ケース② 水位操作規則制定以後の平均的な水位変動。平成4年から平成16年までの同日平均をとったパターン。ただし、他の年と比べて大きく傾向の異なる平成7年、8年及び12年は除外した。

ケース③ コイ科魚類の産卵及び稚仔魚の成育に配慮した運用操作開始後の平均的な水位変動。運用開始後の平成17年と平成18年の琵琶湖平均日水位の同日平均をとったパターン。

表-2 等深線変化モデルの計算条件

	ケース①	ケース②	ケース③
琵琶湖水位	S57-H3 平均	H4-16 平均	H17-18 平均
供給土砂量	0.0m ³ /年		
波浪	四季別平均(m) 春:0.18, 夏:0.19, 秋:0.25, 冬:0.26		
	四季別卓越方向(N° E) 春:320.4, 夏:326.2, 秋:326.8, 冬:322.8		
初期地形	平成4年実測地形(深淺測量) (湖岸保全施設が設置される前の地形)		
計算期間	20年間(平成4年から平成24年まで)		

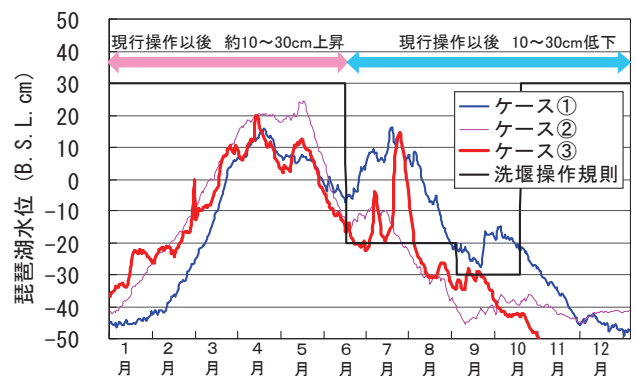


図-8 数値計算で与えた水位変動パターン

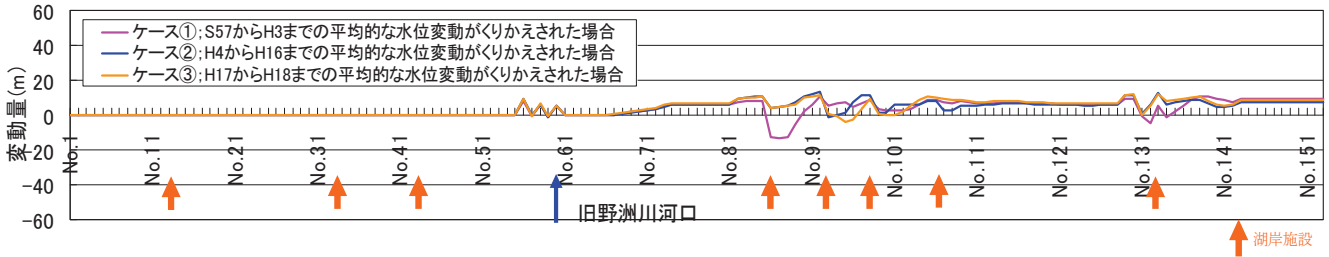


図-9 湖岸保全施設がある場合の汀線変化 (H14 - H24)

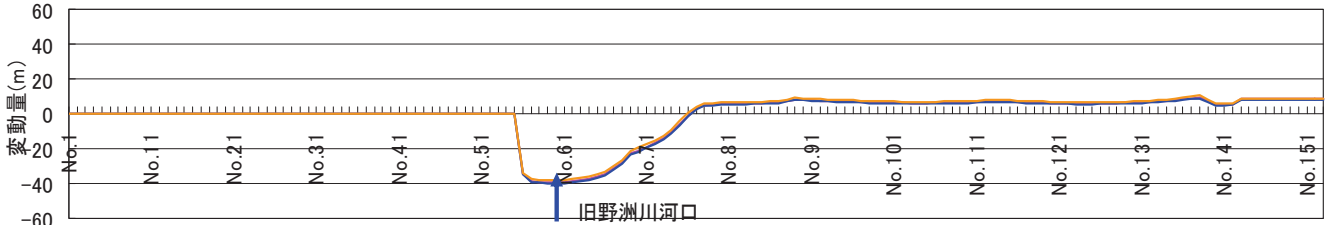


図-10 湖岸保全施設がない場合の汀線変化 (H14 - H24)

4-2 湖岸保全施設がある場合の汀線変化

湖岸保全施設がある場合の汀線変動量の計算結果を図-9に示す。ここでは、紙面の都合上、20年間の計算期間のうち、後半10年分(平成14年から24年まで)の変動量のみを示す。解析の結果、湖岸保全施設が設置され一旦(鋸状に)落ち着いた汀線は、その後はほとんど変動しないと予測された。

琵琶湖水位との関係を見ると、琵琶湖水位については、ケース③で汀線の後退が最も少ないとの結果が得られた。ケース③は、コイ科魚類の産卵や稚仔魚の生育に配慮した運用³⁾により、3月から5月の水位が最も低く抑えられている水位変動パターンである。

4-3 湖岸保全施設がない場合の汀線変化

次に、湖岸保全施設がない場合の予測結果を図-10に示す。ここでも、20年間の計算期間のうち後半10年分の変動量のみを示す。解析の結果、湖岸保全施設がない場合は、旧野洲川北流河口部を中心に汀線が大きく後退し続けると予測されている。琵琶湖水位については各ケースによる差はほとんど見られなかったが、湖岸保全施設がある場合と同様に、ケース③で汀線の後退がわずかに少ないとの結果が得られた。

5. 湖岸保全施設によらない湖岸管理の検討

5-1 琵琶湖水位管理

(1) 琵琶湖水位と土砂変動量の関係

湖岸保全施設がない状態で、琵琶湖水位を変化させた場合の湖岸の侵食量(堆積量)を計算した。シミュレーションでは、季節(1-3月、4-6月、7-9月、10-12月)別にB.S.L.-1.0mからB.S.L.+1.0mまでの間で0.1mピッチに一定の水位を与え続け、3ヶ月間の土

砂紙面の都合上、計算結果のうち、No.61測線における1月から3月の琵琶湖水位と土砂変動量の関係を図-11に示す。このNo.61測線は、湖岸保全施設がない場合に最も汀線後退が顕著と予測された箇所である。

ここから、琵琶湖水位がB.S.L.+0.3mを超えると、湖岸侵食が一段と進行しやすくなることが確認できる。この傾向は他の季節においても同様に見られた。また、滋賀県が同様の解析を愛知川河口部周辺で実施しており、ここでもほぼ同様の結果が得られている。この結果は、琵琶湖水位がB.S.L.+0.3mを超えると侵食災害が発生しやすいとの定説を肯定するものであった。

表-3 計算条件(琵琶湖水位と土砂変動量の関係)

湖岸施設	なし
琵琶湖水位	B.S.L. - 1.0m → +1.0m (10cmピッチで一定値)
供給漂砂量	0.0m ³ /年
波高・波向	四季別平均(m)・四季別卓越方向(N°E)
計算期間	3ヶ月毎(季節毎)

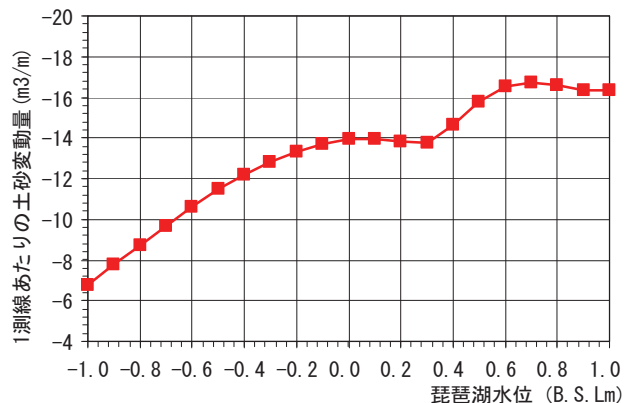


図-11 琵琶湖水位と土砂変動量 (No.61 測線, 1 ~ 3月)

(2) 湖岸侵食対策としての琵琶湖水位管理

既往調査結果⁴⁾から、琵琶湖岸の砂浜の天端高(バーム高)の平均値を求めると、湖東側、湖西側でそれぞれ、B.S.L.+0.900±SE0.168m、B.S.L.+0.763±SE0.186mとなっており、湖西側が10数cmほど低い。

砂浜天端高は、琵琶湖水位と波の打ちあげ高さで決まることが知られている。波の打ちあげ高さは、波の形状(波形勾配)によっても異なるが、1/8～1/10程度の斜面においては沖波波高の0.5～4倍程度で求められる⁵⁾。年間の平均的な有義波高は湖西側では湖東側に比べ6cm程度低いため、波の打ちあげ高は3cm～24cm程度低くなる。ここから、湖東側に対する湖西側の砂浜天端高の差20cmは、波による打ちあげ高の差で生じたと推定できる。ただし、確実な推定ではないため、湖西側の代表的な河川でも同様の数値解析による検証を行うことが望ましい。

以上のことから、旧野洲川北流河口部周辺だけでなく、湖西側をも含む琵琶湖岸全体で、B.S.L.+0.3mを閾値(湖岸侵食が急激に進み始める値)と考えられ、急激な湖岸侵食を抑えるためには、B.S.L.+0.3m以下に琵琶湖水位を抑えておくことが望ましいと考えられる。この意味では、平成17年度以降に3月から5月の琵琶湖水位をB.S.L.+0.1m程度に抑える運用操作は、湖岸侵食対策としても有効と言える。

5-2 流入河川の総合的な土砂管理

(1) 供給漂砂量と湖岸形状の関係

次に湖岸保全施設がない場合に、供給漂砂量と湖岸形状の変化量の関係を調べた。計算条件を表-4、計算結果を図-12に示す。計算の結果、およそ4,600m³/年のときに岸沖方向の土砂変動量の収支が±0m³/s(動的平衡状態)になると予測された。

表-4 計算条件(供給漂砂量と湖岸形状の関係)

湖岸施設	なし
琵琶湖水位	H4-H16平均パターン
供給漂砂量	1,000m ³ /年ピッチで変化
波高・波向	四季別平均(m)・四季別卓越方向(N°E)
計算期間	1年間

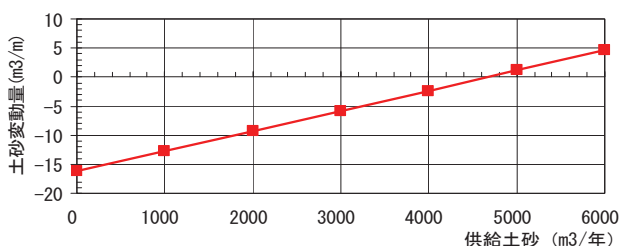


図-12 供給土砂量と土砂変動量 (No.61 測線, 1～3月)

(2) 湖岸侵食対策としての土砂管理

山地～河道域モデルによる解析結果では、現在、野洲川放水路の河口部に到達する流下土砂のうち、砂浜材料に適する粒径(0.1～3.4mm)のものは、約9200m³/sとなっている。また、河口域モデルによる解析結果では、この流下土砂のほぼ全量が放水路河口部で堆積し続けており、沿岸漂砂として湖岸に供給されていないとの結果が得られている。

このことは、北流河口周辺に沿岸漂砂としてバイパスすることができれば、湖岸保全施設無しでも、旧野洲川北流河口部付近の湖岸侵食を止られる可能性を示唆している。

6. おわりに

これまでの琵琶湖では、次々と侵食災害が発生する中、対症療法としての湖岸保全施設に頼らざるを得ない状況であった。このような中、本研究では湖岸保全施設がない状態で、堆積量と侵食量がバランスする動的平衡状態が確保される条件を整理することができた。

本研究が、次世代の湖岸管理のあり方について考える一助になれば幸いである。

7. 謝辞

近畿地方整備局琵琶湖河川事務所の佐久間河川環境課長をはじめとするスタッフの皆さまは、本研究の機会を与えて下さり、終始力強く私たちを支えて下さいました。滋賀県土木交通部河港課の皆さまは、研究に必要な様々なデータを快く提供して下さいました。

皆さまに心から感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 芹沢真澄・宇多高明他：海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル，海岸工学論文集，第49巻，pp496-500，2002
- 2) 熊田貴之・小林昭男他：粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化モデル，海岸工学論文集，第51巻，pp441-445，2004
- 3) 近畿地方整備局琵琶湖河川事務所：平成18年度瀬田川洗堰操作の課題と平成19年度操作の方針について，第9回水陸移行帯WG会議資料-3.2，2007
- 4) 水資源機構：平成16年度琵琶湖湖岸侵食状況調査業務報告書，2005.3
- 5) Savage, R.P.: Laboratory Data on Wave Run-up on Roughed and Permeable Slopes, Proc. ASCE Vol.84, WW3,1958.