

# 流砂・漂砂系における土砂動態モデルの構築と琵琶湖湖岸土砂管理の検討

STUDY ON NUMERICAL SIMULATION OF SEDIMENT TRANSPORT FROM  
SEDIMENT FLOW SYSTEM TO LITTORAL DRIFT SYSTEM AND LAKE BIWA  
SHORE SEDIMENT MANAGEMENT

森川 浩<sup>1</sup>・伊藤禎和<sup>2</sup>・橋本将明<sup>2</sup>・あべ松保貴<sup>3</sup>・田中耕司<sup>4</sup>・中辻崇浩<sup>5</sup>・木内 啓<sup>5</sup>  
Hiroshi MORIKAWA, Sadakazu ITO, Masaaki HASHIMOTO, Yasutaka ABEMATSU,  
Kohji TANAKA, Takahiro NAKATSUJI and Hiroshi KIUCHI

<sup>1</sup>博(工) ㈱建設技術研究所 大阪本社 河川部 (〒732-0052 広島県広島市東区光町1-13-20)

<sup>2</sup>正会員 工修 ㈱建設技術研究所 大阪本社 河川部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7北浜MIDビル)

<sup>3</sup>㈱建設技術研究所 大阪本社 地圏環境部 (同 上)

<sup>4</sup>正会員 工修 ㈱建設技術研究所 大阪本社 情報技術部 (同 上)

<sup>5</sup>正会員 ㈱建設技術研究所 大阪本社 河川部 (同 上)

For Echigawa basin around Lake Biwa, we create a numerical analysis model capable of keeping track of sediment transport from mountains to rivers and lakeshore areas. Through the model application, it was estimated that the erosion of the lakeshore was influenced by past dam construction, sabo facilities, and gravel quarrying in river. 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 tributary rivers (2) keeping the water level of Lake Biwa at or below BSL+0.3m (BSL= Biwako Surface Level).

**Key Words :** *sediment transport model, sediment flow system, littoral drift system, management of lakeshore sediment, lake water level control*

## 1. はじめに

近年、水系一貫の土砂管理に重大な関心が寄せられ、山地から海岸までの土砂移動特性の研究やそのモデル化が多く行われている。流域全体の土砂管理計画の検討や対策効果を把握するには、山地から海岸域への土砂移動量とその粒度構成を算出することが必要となり、全国的に統一だった検討結果<sup>1)</sup>も存在する。また、土砂の連続性回復のためにダムにおいては排砂バイパストンネルやフラッシング排砂といった大規模な施設を伴う対策や、土砂掘削や浚渫と下流への土砂還元を組み合わせた対策も行われ、その影響を把握する研究もなされている。

本稿では、上記の総合土砂管理と同様のアプローチで、土砂の発生域～影響域までの動態を扱っているが、琵琶湖を対象フィールドとし、供給土砂減少の影響を受ける海岸領域を「湖岸」に置き換えて検討を進めている。海岸と湖岸の土砂動態に与える要因を比較すると、海水位が自然発生的であるのに対し、湖水位は人為的に変化可

能な場合もあることに大きな違いがあり、湖水位管理の観点からも検討を加えていることに特徴がある。

本報告で対象とする琵琶湖では、平成4年頃から湖岸の侵食災害が頻発するようになり、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が整備されてきた。しかし、侵食防止効果はみられるが、汀線が鋸状にな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、施設によらない湖岸管理も望まれるようになりつつある。

これまで、湖岸形状変化の要因として、琵琶湖の水位変化や供給土砂量の減少などが指摘されてきたが、これらの影響の程度は明確でなかった。そこで本検討では、滋賀県が管理している愛知川を対象とし、山地から河川、湖岸域に至るまでの一連の土砂移動を追跡できる解析モデルを構築し、各要因が湖岸形状に与える影響を評価し、さらに湖岸保全施設以外の施策による湖岸管理の可能性を探った。

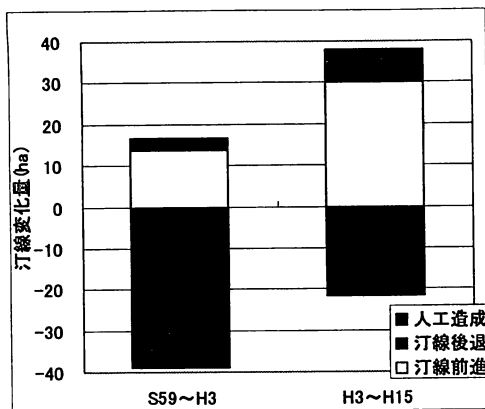


図-1 琵琶湖北湖の汀線変化量

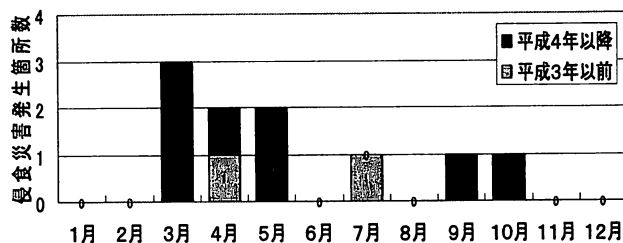


図-2 侵食災害の発生傾向

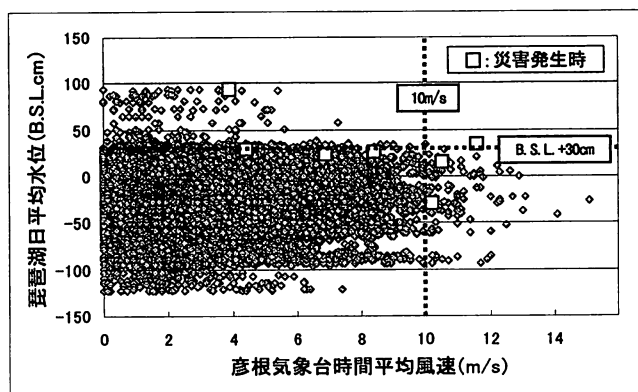


図-3 侵食災害の発生条件(琵琶湖水位と風速)

## 2. 琵琶湖湖岸の現状と愛知川流域の概要

### (1) 湖岸形状の全体的な傾向

琵琶湖北湖における、昭和59年～平成3年の8年間と平成3～15年の13年間の汀線の前進と後退を航空写真から100mピッチで判読し、それを集計したものを図-1に示す。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年を中間年としている。これから、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わかる。要因は突堤など面的防護の効果であると考えられるが、全体としては、以前の湖岸域までは回復していない。

### (2) 琵琶湖水位と湖岸侵食の関係

平成3～平成15年では北湖の湖岸域は全体的に侵食傾

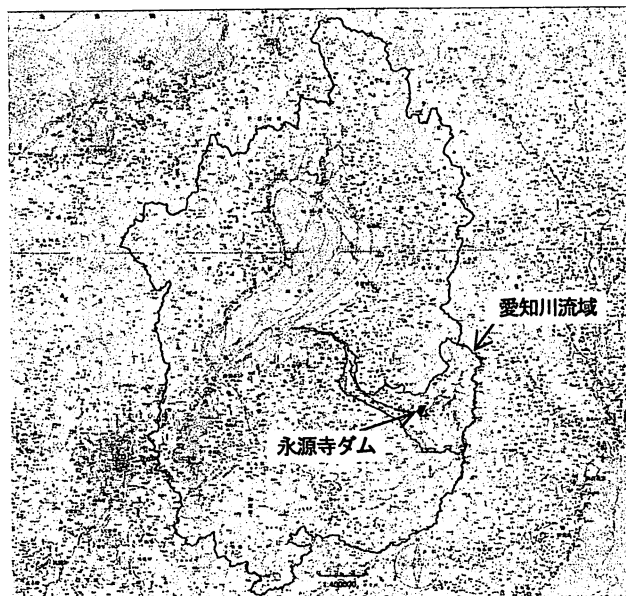


図-4 滋賀県全域と愛知川流域との関係

向が改善されているが、一方で平成4年以降、湖岸の侵食災害(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。図-2はその発生状況を月別に整理したものであるが、一年のうちで琵琶湖水位が比較的高い3月から5月に集中しており、湖岸侵食に与える湖水位の影響が確認できる。

また、平成3～12年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の関係を整理したものを図-3に示す。侵食被害が発生した日のデータを□で示しているが、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、侵食災害が発生しやすいことがわかる。湖沼においては、風速が大きな期間における波浪の他に、初期状態としての湖水位の影響が大きいことが認められる。

### (3) 愛知川流域の概要

愛知川は滋賀県南東部に位置し、幹線流路延長48km、流域面積223km<sup>2</sup>の一級河川であり、鈴鹿山脈の御池岳に源を発し南南西に流下し、山地内で神崎川・御池川をあわせ、半径12～13kmの緩い扇状地を形成し琵琶湖へ注ぐ。愛知川流域は70%近くが鈴鹿山脈の西麓を深く浸食する峡谷地帯であり、流域に占める山地部(土砂生産域)の割合は周辺河川(犬上川・日野川・野洲川)と比較して高い。また、流域内には、多くの砂防施設も設置されている。

山地部最下流付近には農業用水源及び発電を目的とした永源寺ダム(1972)が築造されている。永源寺ダムでは、ダムの堆砂により貯水容量の減少が生じることから、ダム湖の上流部に流入してくる土砂を溜め、この土砂を定期的に排除するための土砂溜め堰が設置されている。

また、平野部を流下する愛知川では、近年河床低下が発生し、橋台の露出などの影響もみられる。

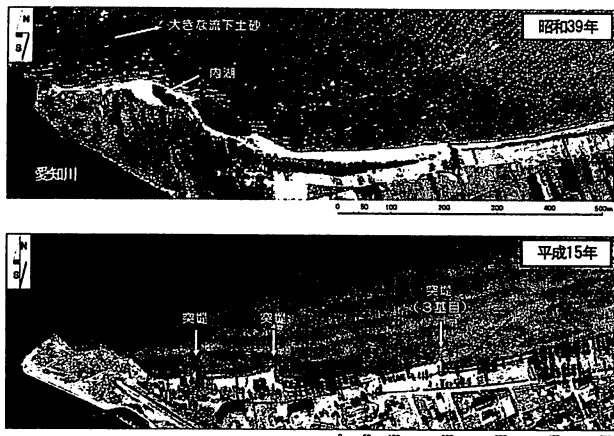


写真-1 愛知川河口周辺での汀線変化

#### (4) 愛知川河口周辺での傾向

写真-1は愛知川右岸の新海浜付近の航空写真の比較を行ったものである。昭和36年当時は土砂の供給が活発であったので、大きな砂浜が維持されているのに対し、平成15年には汀線が大きく後退しているのがわかる。また、砂浜の後退を防止するため、突堤が設置されているが、鋸状の湖岸地形になっている。

### 3. 流砂・漂砂系における土砂動態モデルの構築

#### (1) 土砂動態モデルの概要

愛知川流域の流砂・漂砂系において、土砂の移動状況を発生域からその影響域まで一体となって解析可能なモデルを構築する。そのため、図-5に示すように、対象領域を地形状況等により「山地領域」、「河道領域」、「湖岸領域」の3領域に分割し、個別領域内でモデルを構築し、各々を動的に接続することによりモデルを構成した。

山地領域では、降雨と土砂の流出量が同時に算出できるモデルを、河道領域では流入・流出土砂量が考慮でき、河道変化の再現が可能なモデルを、湖岸領域では河道からの流出土砂量を受け、汀線変化が定量的に把握できる土砂動態モデルを構築した。以下、個別モデルの概要とその構築状況について述べる。

#### (2) 山地領域における土砂流出モデルの構築

山地領域における土砂流出の算出には、江頭ら<sup>2)</sup>が開発した土砂流出モデルを採用した。このモデルは、kinematic wave法による中間層を考慮した降雨流出と、その掃流力による土砂流出（全流砂）を一体として扱ったもので、水文・水理学的な手法<sup>3)</sup>に分類される。

流域は図-6に示すように、永源寺ダムを含む山地領域を95流域に分割し、それらを接続することにより、降雨と土砂の流出量を算出した。データの存在状況から検証期間は昭和58～平成16年とし、流域と河道のモデル定数

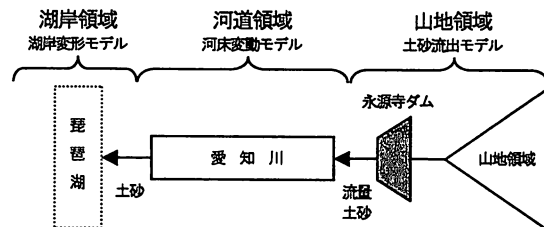


図-5 土砂動態モデルの概念図

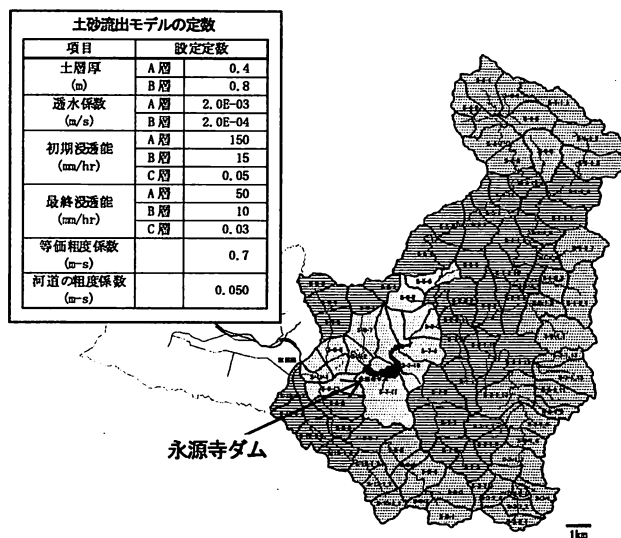


図-6 土砂流出モデルにおける流域分割とモデル定数

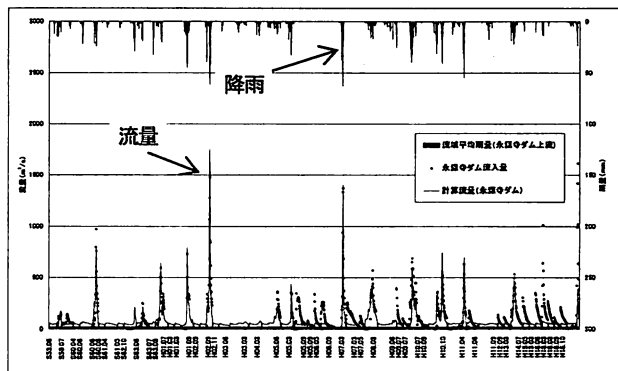


図-7 土砂流出モデルにおける流量の再現結果

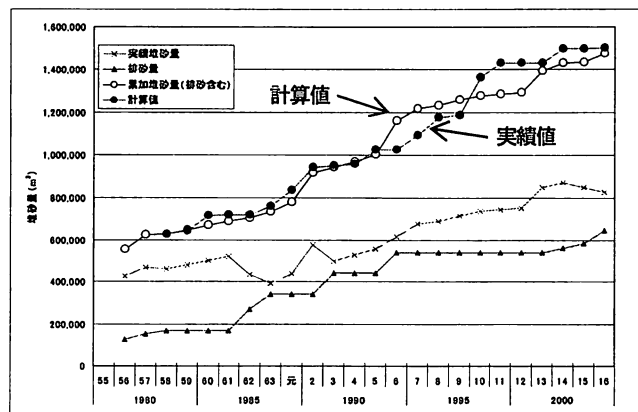


図-8 永源寺ダムにおける堆砂量の再現結果

表-2 一次元河床変動計算の定数等

| 項目      | 内 容                                                                          |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|
| 対象区間    | 0.0k～26.3k                                                                   |
| 検証期間    | 昭和60年～平成12年                                                                  |
| 初期河道    | 昭和60年測量                                                                      |
| 流量・水位条件 | 山地流出モデルの26.3k地点（紅葉橋）での降雨流出計算結果を用いた。<br>下流端水位は、H-Q式より換算した水位を与えた。              |
| 河床材料    | 平成8年度に実施された河床材料調査結果をもとに設定した（混合粒径）。<br>粒径区分については、各セグメントにおける平均値で設定し、12区分とした。   |
| 流入土砂量   | 山地領域モデルによる計算結果のうち和南川、渋川および残流域における土砂が流入するものとした。                               |
| 交換層厚    | 10cm                                                                         |
| 粗度係数    | 低水路 0.0k～2.0k 0.022 2.2k～26.3k 0.035<br>高水路 0.0k～2.0k 0.020 2.2k～26.3k 0.035 |
| 空隙率     | 0.4                                                                          |

表-3 汀線変化モデルの定数等

| 項 目      | 内 容                                                                                                                                                                                              |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 解析対象範囲   | 沿岸方向： L=6.9km, 岸沖方向： L=約500m                                                                                                                                                                     |
| 解析サイズ    | $\Delta X=20m$ ピッチ, $\Delta Z=0.5m$                                                                                                                                                              |
| 初期地形     | 平成4年深淺測量データを基本                                                                                                                                                                                   |
| 計算期間     | 平成4年～平成15年の12ヵ年                                                                                                                                                                                  |
| 入射波条件    | 琵琶湖湖心の風向・風速観測値をもとに有義波法により有義波を算定し、季節別川にエネルギー平均波高を設定<br>冬期（1～3月） Hb=0.34m, 周期 T=1.78sec<br>春期（4～6月） Hb=0.24m, 周期 T=1.41sec<br>夏期（7～9月） Hb=0.24m, 周期 T=1.38sec<br>秋期（10～12月） Hb=0.33m, 周期 T=1.59sec |
| 代表粒径     | 平成6年の底質材料調査結果より設定                                                                                                                                                                                |
| 限界勾配     | 既往研究にもとづき一次設定値を以下のとおり設定。<br>水中： $\tan \theta g=1/3$ 陸上： $\tan \theta g=1/2$                                                                                                                      |
| 混合層厚     | 混合層厚 $\Delta Ds=100m$                                                                                                                                                                            |
| 浚渫・投入土砂量 | 既存記録より以下のとおり設定。<br>1) 測線No. 163～168 L=100m, 1993/8実施, 養浜期間30日間<br>2) 測線No. 254～263 L=180m, 1993/8実施, 養浜期間30日間                                                                                    |
| 構造物の設定   | 突堤・導流堤：14基, 護岸：3箇所                                                                                                                                                                               |

は同じく図-6内に示すとおりとした。図-7に永源寺ダムにおける流入量の検証結果を示すが、とくに土砂流出に寄与する大規模洪水については良好に再現できている。

流砂量式については、掃流砂は芦田・道上式、浮遊砂はLane-Kalinske式を用い、ウォッシュロード成分（0.1mm以下）は、堆積物の侵食により含有分が流出する<sup>2)</sup>とした。山地領域における河床材料調査は、平成8年度調査を基本としたが、この調査結果では、最大粒径は5cm程度となっていた。しかし、愛知川での現地踏査では30cm程度の巨石がみられたことから、土砂流出モデルに用いる生産土砂の分布は、最大粒径を30cmとして河床材料の分布を変更した。一方、生産土砂にはウォッシュロードも存在するが、これについても河床材料調査で十分に計測できないことが多い。そのため、土砂流出モデルにおいては、このウォッシュロード成分の含有率を3%に設定することにより永源寺ダム堆砂量を再現した。その検証結果を図-8に示すが、最終年度における実績と計算結果の誤差は3%程度となった。

(3) 河川における河床変動モデルの構築

河道領域における河床変動モデルは、土砂の移動や質的な変化を把握するためによく用いられる混合粒径の一

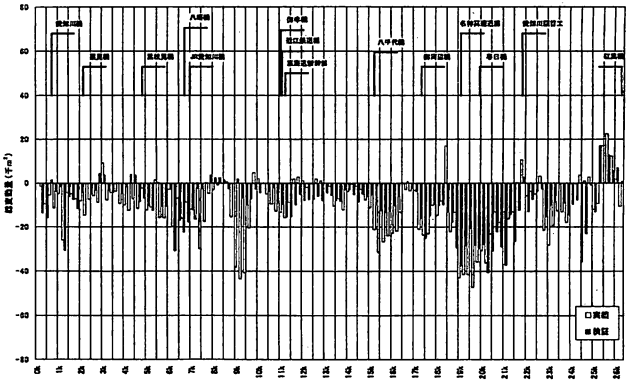


図-9 河道モデルによる各断面のボリューム再現結果

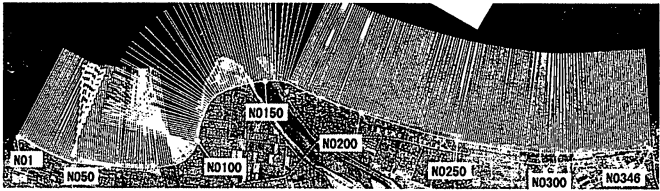


写真-2 汀線変化モデルの側線



図-10 湖岸の汀線変化の再現結果

次元河床変動計算を用いた<sup>4)</sup>。

表-2に河床変動モデルの諸元を示すが、永源寺ダムからの土砂流出量はなしとし、ダム下流に存在する支川からの土砂流出を上流端に与えて再現検証を行った。

図-9には、昭和60年～平成12年の実績の河床変化と計算結果の比較を示す。実績の河床変動量をみると、全体的に河床低下の傾向にあるが、これは永源寺ダムによる土砂の捕捉や、昭和60年～平成6年の間に行われた、砂利採取による河床掘削が要因である。検証計算の結果、実績に対して誤差は10%程度であった。

(4) 湖岸侵食モデルの構築

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<sup>5)</sup>により提案された海浜横断形の安定化機構を導入しており、岸沖方向の漂砂の移動を考慮している。また、熊田ら<sup>6)</sup>による粒度組成に応じた平衡勾配の概念を適用し、混合粒径での再現計算を可能としている。

以下にモデルの基礎式を示す。

$$q_x = \varepsilon_z(z) \cdot K_x \cdot (EC_g)_b \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad (1)$$

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

表-3 過去のインパクトの影響評価の条件

| 項目   | 内 容                                                                                                                 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 砂利採取 | 河道モデルにおいて砂利採取がなかった場合の河床の変動量や湖岸への土砂流出量を算出する。                                                                         |
| ダム   | 山地モデルにおいて永源寺ダムがない場合の土砂流出量を算出し、河道に接続することにより影響を把握する。                                                                  |
| 砂防施設 | 永源寺ダム上流域の砂防施設については効果が小さいものとし、永源寺ダム上流域以外の施設を対象とする。この地域におけるS59～H8の施設効果量は670千 $m^3$ 程度であり、これら砂防施設がなかったとして、土砂供給量を増加させる。 |

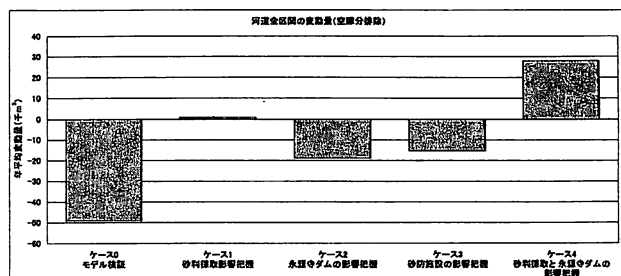


図-11 河道での過去のインパクトの影響の算出結果

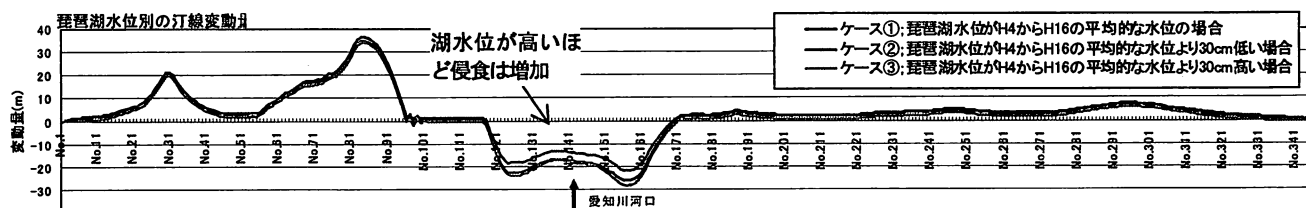


図-12 河道モデルによる各断面のボリューム再現結果

ここに、

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

$e_z(z)$ : 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( $N \cdot m^2/s$ )

$\alpha_b$ : 等深線に対する波向角(rad)

$\beta_c$ : 安定勾配角(rad),  $\beta$ : 断面勾配(rad)

検証計算は、平成4～15年までの12ヵ年における汀線変化との比較によって行った。再現結果は図-10に示すとおりであり、3期間に分けて表現した経年的な汀線変化を概ね再現可能となった。

#### 4. 過去に発生したインパクトの影響評価

##### (1) 山地・河道における影響分析

愛知川流域の流砂系(上流域～河道域～河口)において、過去のインパクト(人為的改変)が河道や湖岸に与えた影響の程度を把握する。具体には、前章で作成したモデルを用いて、インパクトがなかった場合の河道に与える影響と、湖岸への土砂供給量の変化をみる。ここで検討するインパクトとしては、「永源寺ダムの供用」、「砂防施設の設置」、「砂利採取」であり、それらのモデル上の考え方は表-3に示すとおりとした。

図-11に各ケースの河道全区間での総変動量を示す。再現計算(現況)においては河床の低下が進行しているが、砂利採取や永源寺ダムがなかった場合には、河床低下が大きくは進行しなかったことが推定できる。ただし、砂利採取と永源寺ダムがともにない場合には、堆積傾向となり、治水上の問題発生も想定される。なお、湖内への土砂流出量を算出した結果、各施策により総量で3,000 $m^3$ /年程度減少していることがわかった。

##### (2) 湖岸における影響分析

図は省略するが、現在の湖岸施設が設置されている場合、愛知川からの供給土砂量がゼロであっても、将来的には概ね現在の湖岸形状が維持されることがわかり、人工的な施設設置の効果が大きいことは確認できた。

一方、湖水位によるインパクトを把握するため、湖岸保全施設が設置されていない状況において、以下の3つのケースにおいて湖岸変化状況を推定した。

①10ヵ年の水位(平成4年～平成16年。ただし、平成7, 8, 12年を除く)

②ケース①より30cm低い水位

③ケース①より30cm高い水位

結果は図-12に示すとおりであるが、湖水位が高いほど湖岸域の減少に与える影響は大きく、砂浜の形成・維持には湖水位管理の観点も重要であることがわかる。

#### 5. 湖岸のダイナミズム回復の可能性検討

ここでは、湖岸保全施設がない場合(湖岸のダイナミズムを回復させた状態)を想定し、動的平衡状態(侵食量と堆積量とがバランスして汀線が安定する状態＝砂が動きながら形状が維持される状態)の確保の可能性と、それを踏まえた上での今後の湖岸管理のあり方について検討する。

まず、愛知川からの供給土砂量を変化させた場合の側線No.160における土砂の変動量を図-13に示す。この結果から、湖岸保全施設がない場合でも砂浜に寄与する粒径(平成7年度調査では2mm程度)が年3000 $m^3$ 程度供給されれば湖岸は維持できることがわかる。

一方、湖水位を変化させた場合の土砂変動量のうち、

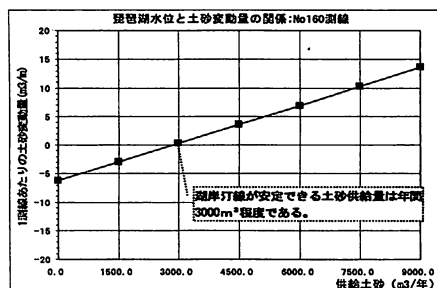


図-13 供給土砂量を変化させた場合の湖岸の変化量

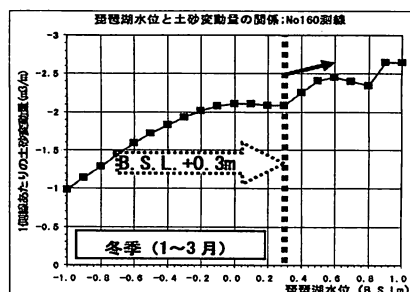


図-14 湖水位を変化させた場合の湖岸の変動量

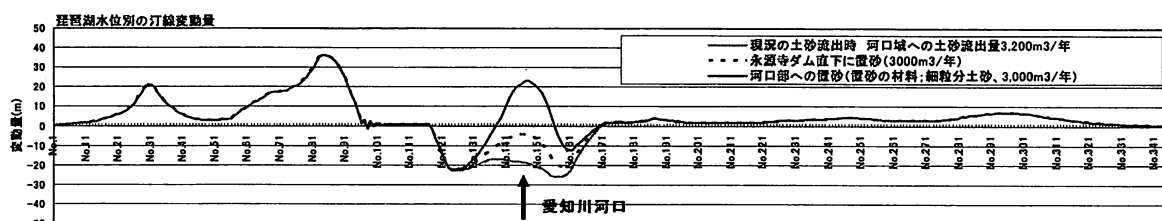


図-15 河道や河口部に置砂を行った場合の湖岸の変化 (現況との比較)

冬季における計算結果を図-14に示す。これより、B.S.L.+0.3mを上回ると湖岸の侵食が増加することがわかる。

最後に、河川における対策例として、ダム直下と河口付近に置砂を年間3000m³（湖岸に寄与する粒径の割合は34%程度）実施した場合を想定し、湖岸変化の計算結果を図-15に示す。ダム直下に置砂を行っても自然流下により全てが湖岸に到達するわけではなく、河口付近に直接置砂を実施した場合の方が効果は大きい。しかし、ダム直下に配置した場合でも湖岸保全への有効性はみられ、河川における土砂の連続性の向上も含めて今後取り入れるべき一施策であると考えられる。

の河道形状では、自然の流れだけで河口域からの土砂供給を復活させることは難しいことがわかった。

これまでは、湖岸保全施設により侵食防止が最優先されていたが、本報告による検討により、湖岸形状のダイナミズムを回復できる条件を整理することが可能となった。この結果に基づき、今後、土砂の連続性回復を含めた湖岸、湖水位管理が望まれる。

謝辞：本検討を実施するにあたり、滋賀県土木交通部河港課の渡邊康司さん（検討時所属）をはじめ皆様には、データ収集など様々な面でご尽力頂きました。記して謝意を表します。

## 6. おわりに

琵琶湖に流入する愛知川流砂系における土砂動態モデルを3領域に分割して構築し、過去の影響把握と、湖岸のダイナミズムを回復させるための施策の方向性について検討した。得られた結果を以下に整理する。

- 1) 愛知川の流砂・漂砂系における土砂移動状況を把握するため、山地、河道、湖岸領域に分割して個別モデルを作成し、それらを接続することにより土砂動態モデルを構築した。構築したモデルによって各領域の土砂移動状況について検証計算を行った結果、過去の実績変動量が概ね再現可能となった。
- 2) 構築したモデルにより、過去の人為的なインパクトが湖岸に与えた影響を算出した。その結果、山地におけるダムや砂防施設、河道における砂利採取、湖水位変化による影響が大きいことがわかった。
- 3) 湖岸のダイナミズム回復の可能性を検討した結果、全季節において、琵琶湖水位をBSL+0.3m以下にすることが望ましく、年間3,000m³の土砂供給量があれば湖岸は安定することがわかった。しかし、現状

## 参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課他：水系一貫土砂管理に向けた河川における土砂観測、土砂動態マップの作成及びモニター体制構築に関する研究、平成13年度国土交通省国土技術研究会報告、指定課題、pp. 6-1~48, 2001。
- 2) 江頭進治・松木 敬：貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法、水工学論文集、第44巻、pp. 735-740, 2000。
- 3) 江頭進治：土砂流出予測法、第37回水工学に関する夏期研修会講義集Aコース、pp. A-2-1~A-2-14, 2001。
- 4) 例えば、末次忠司・日下部隆昭・谷口丞：土砂動態予測のための河床変動モデルの改良 一瀬沼川を事例として一、国総研資料第69号, 2003。
- 5) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之：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、pp. 496-500, 2002。
- 6) 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁：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、pp. 441-445, 2004。

(2009. 4. 9受付)