

由良川河口周辺地形の変動に及ぼす河川流量の影響について

出口 一郎*・千 受 京**・石川 裕 夏**・小野 正 順***

1. はじめに

従来から全国的な規模で問題となっている海岸侵食の原因として海域における各種構造物の建設による漂砂移動の連続性の阻止、沖合いへ土砂損失、地盤沈下、および河口部の砂利採取などがあげられている。侵食によって消失された海浜の面積は明治-昭和が 72 ha/年、昭和-平成が 160 ha/年となっており、侵食の激化が急速に進んでいると報告している(田中, 1993)。海域の砂は河川流域で生産された土砂の流下によって供給される場合が多いことから、土砂の輸送力となる河川流量の変動による河口周辺地形の応答特性を把握することが重要である。河口は海域への土砂供給の通路となり、複雑な流体運動のゆえ、多様の地形が時々刻々形成され、変形・崩壊という過程を繰り返しているところであることから、広範な沿岸域の土砂環境を維持管理するためには河口が沿岸域の土砂収支に果たす役割を十分に把握する必要がある。

本研究では海岸侵食の一因と言われている治水・利水のためのダム建設、河道改修などによる河口流出土砂量の減少があるにも関わらず、顕著な海岸侵食が起こっていない 1 級河川の由良川河口周辺において、過去 20 年間の河口周辺深浅測量データと河川流量データを用いて長期間にわたる河口地形変動特性と河口周辺地形の変動に及ぼす河川流量の影響を検討した。

2. 由良川及び周辺海域の現況と解析データ

由良川は図-1 に示すように、その源を京都、滋賀、福井の府県境三国ヶ岳に発し、流域は京都府および兵庫県にまたがり、流域面積が 1,880 km²、幹線流路延長が 146 km に及ぶ河川で、京都府下の約 1/4 の流域面積を占め、日本海に注いでいる 1 級河川である。

流域の大部分が山地であり、その比率は山地 89%、平地 11% の山地河川である。1961 年に河川上流 44 km 地点に流量調節用の大野ダム、その後の和知ダム(河川上

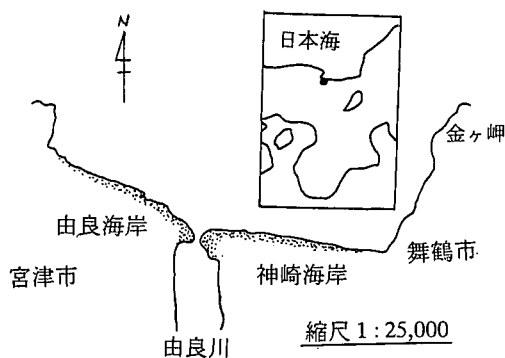


図-1 由良川の位置図

流 40 km) が建設された。河道内の骨材採取が 1985 年まで進められてきたが、その以後から現在までには行われていない。また、下流部においては砂州形成により漁船の出入りが問題となってこれを解除するため、年 2 回程度河道掘削が行われている。川幅は砂州が形成される渇水時には最狭部で 30-50 m、平水時には 130-140 m、最大時には 450 m 程度である。河床勾配は 1/4,000、河床材料の平均粒径は約 2 mm である。

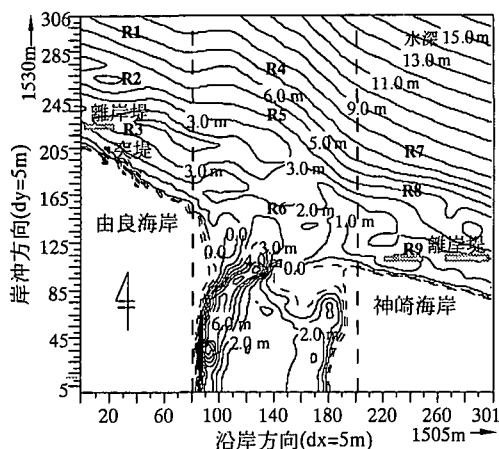
一方、河口右岸には神崎海岸、左岸には由良海岸があり、両海岸共に砂浜を有しており、従来から海水浴場として周辺の人々に親しまれてきた海岸である。海底勾配は約 1/50、海浜の底質粒径は約 0.5 mm である。また、河口部では様々な形状の砂州地形の形成とフラッシュを繰り返しているが、完全閉塞までには至っていない。ただし、閉塞寸前の砂州地形が形成された時に大出水があると砂州崩壊前の河口水位上昇により堤内地の氾濫が生じて周辺の民家、田畑などに浸水被害が発生したこともある(近畿地方建設局福知山工事事務所, 1981)。

海岸侵食防止の一環として 1967 年に河口右岸の水深 1.5-2 m の位置に離岸堤 1 基が設置され、その後 1969 年にもう 1 基が建設された。また、1978 年には、河口左岸に突堤 3 基が建設され、1983 年には離岸堤が 2 基が建設されている。この後も離岸堤の設置が行われ、現在は両海岸ともにそれぞれ 8 基が設置されている。しかし、導流堤等の河口処理工は設けられていない。

* 正 会 員 工 博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

** 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科

*** 正 会 員 工 博 大阪大学講師 工学部土木工学科



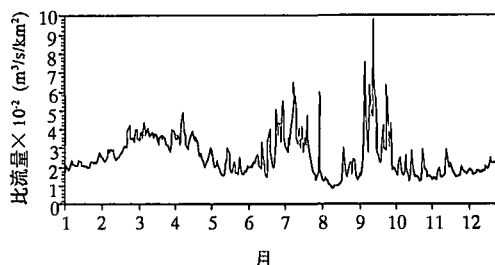
図一2 由良川河口周辺の初期地形と領域分割図

本研究では、建設省福知山工事事務所で年2-3回行われている由良川河口地形の深浅測量結果のうち、1964年から1984年まで20年間の河口周辺深浅図を用いた河口を含む沿岸方向1.505 km、岸沖方向1.53 kmの範囲のデータと福知山流量観測所で観測された同期間の日平均流量データを用いて解析を行った。図一2は後述する一連の土砂量の経年変化解析の初期値となる1964年9月の由良川河口周辺地形及び全領域を9つの領域で分割したものである。

流域の年降雨量は流域平均1,400-2,200 mm程度、平均年最大流量は約1,700 m³/sであり、河口付近の計画高水流量は5,800 m³/sである。河口より上流23 km地点の福知山流量観測所で実測された流量観測結果によると、1964年から1984年まで20年間の最大日平均流量は1,948.6 m³/sで、欠測値を除いた全データ(7646個)の平均流量は49 m³/sである。また、日平均流量の頻度分布を見ると0-50 m³/sの流量が70.5%、50-100 m³/sが21.9%、100-150 m³/sが4.2%、150-400 m³/sが2.8%、400-2,000 m³/sが0.6%を占め、50 m³/s以下の流量が全体の約70%、100 m³/s以下の小規模の流量が約92%でそのほとんどを占めている。400 m³/s以上の中・大出水はわずか0.6%である。図一3は過去20年間にわたる由良川の流量の季節変動を示したものである。ここで、比流量は流域面積(km²)に対する日平均流量(m³/sec)の比である。3-5月の春季は融雪に伴い比較的豊水であり、6-7月の夏季は梅雨前線に伴って豊水である。台風の来襲期にあたる9-10月は1,000 m³/s以上の大出水が1-2回生じる。11-2月の冬季は流量が少ない。

由良川における大出水は6-10月に発生しており、その発生原因は梅雨前線及び台風によるものが1947年-1990年の間で約8割を占めている。

波浪については、継続的な観測資料はなく、1983年か



図一3 由良川の流量の季節変動

ら1984年にかけて関西電力の宮津エネルギー研究所によって宮津沖の水深25 mで実測された資料(1983)によると、有義波高1 m以上の波浪が観測されたのは全体の20%にすぎず、そのほとんどが秋季-冬季にかけて観測され、卓越波向はNNE、周期は4-6秒であった。

3. 対象領域の土砂量の経年変化及び地形変動特性

深浅図の解析によって取得される水深変化量から広範囲な土砂収支の変化および河口砂州地形の変動の経年変化などを検討することより過去20年間(1964-1984)の由良川河口周辺地形の変動特性を調べた。まず、図一2の初期地形を含み、全ての深浅測量図を汀線及び岸沖方向5 m間隔で数値化し、水深変化量、各測線における断面積変化量と汀線位置変化量、及び土砂量の計算を行った。特に土砂量の計算は、図一2に示すように対象全領域の汀線方向に河口右岸、中央及び左岸側の3領域に分割し、さらにそれぞれの領域を水深3 m以浅、3-6 m及び6-9 mの3領域の計9領域に分割して算出した。なお、9 m以深は深浅測量が行われていないデータがあるため、解析領域から除した。

図一4は過去20年間の由良川河口周辺(河道0.5 kmを含む図一2で示すような沿岸方向1.505 km、岸沖方向1.53 kmの沿岸域)の土砂量の経年変化を示したものである。図一4を見ると全領域においては、年ごとに侵食、堆積を繰り返し、1978年11月以降安定し始めやや侵食傾向がみられる。しかし、河川流域内の開発による供給土砂量の減少にも関わらず1978年以後からは河口周辺の土砂収支がとれつつあり、全体として顕著な海岸侵食が起こっていないことが分かる。また、土砂量変化の変動範囲は $\pm 1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度である。図一5は河口近傍の領域R6の土砂量の経年変化を示したものである。

全領域の土砂量変化と同様に経年的な変動を繰り返しているが一方に堆積あるいは侵食が進行する様子はうかがえない。したがって、長期的に見るとR6の領域のみで土砂収支がとれているものと思われる。由良川河口地形の基本的な変動パターンは、冬-春期にかけての河口砂

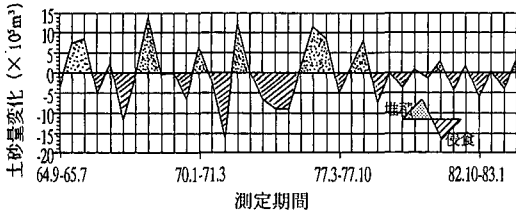


図-4 全領域における土砂量の経年変化

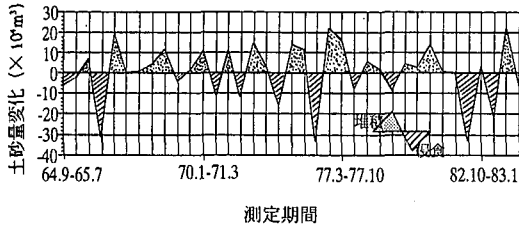


図-5 領域 R6 における土砂量の経年変化

州形成と夏・秋季にかけての砂州のフラッシュである。砂州は2節で述べた卓越波向に対応し、両岸から発達する確率が60.7%で高いが、時として左岸(10.7%)あるいは右岸(28.6%)に発生することもある。由良、神崎両海岸(領域R1, 2, 3及びR7, 8, 9)における汀線変動量と断面積変化量に顕著な相関は認められず、必ずしも沿岸漂砂が卓越するような海浜ではないことがわかった。一方、相続く2回の測量結果から求められる水深変化量を変数とした経験的固有関数法による解析を行ったが、この場合も先に述べた基本的な変動パターンを抽出することができなかった。

4. 河口周辺地形の変動に及ぼす河川流量の影響

海域への土砂供給の輸送力となる河川流量が河口周辺の土砂環境に及ぼす影響を検討するため、河口周辺の土砂量変化と流出流量の相関を調べることにした。

まず、河口周辺地形の変動に対する支配的な河川流量を推定するために深浅図測量前後の期間内の平均流量(Q_{mean})、1/3及び1/10有義流量($Q_{1/3}$, $Q_{1/10}$)、最大流量(Q_{max})を算出し、これらの流量と分割領域R1-R9における土砂量変化の相関を示したのが表-1である。表-1より、河口近傍の領域R6の土砂量変化が流量 Q_{max} と相関が52%で最も高く、領域R5でも相関が22%となるが、その以外の領域では3%以下である。

ついで、深浅図測量全期間にわたる流量の時系列を考えて、全流量データ(7646個)の平均値、1/3及び1/10有義流量を算出し、それぞれを閾値としてこの値を越えた流量の統計値を用いて解析を行った。平均流量

表-1 領域R1-R9の土砂量変化と流量の相関

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Q_{mean}	0.0076	0.0064	0.0027	0.0063	0.1308	0.2764	0.0020	0.0335	0.0371
$Q_{1/3}$	0.0109	0.0143	2×10^{-4}	0.0023	0.1025	0.3851	0.0001	0.0311	0.0215
$Q_{1/10}$	0.0154	0.0006	0.0015	0.0099	0.1216	0.3609	0.0003	0.0479	0.0195
Q_{max}	0.0071	0.0254	0.0042	0.0041	0.2226	0.5220	0.0004	0.0062	0.0197

(Q_{mean})、1/3及び1/10有義流量($Q_{1/3}$, $Q_{1/10}$)はそれぞれ49 m³/s, 97 m³/s及び179 m³/sであった。平均流量を閾値とした場合は土砂量変化との相関が低く、1/10有義流量を閾値とした場合は179 m³/s以下の流量を評価できないことから、1/3有義流量を閾値とした解析を行った。表-2は、領域R6の土砂量変化と対応する期間の1/3有義流量を閾値とした場合の平均流量 $Q_{1/3(\text{mean})}$ 、1/3有義流量 $Q_{1/3(1/3)}$ 、1/10有義流量 $Q_{1/3(1/10)}$ 、及び最大流量 $Q_{1/3(\text{max})}$ の間の相関を示したものである。この場合、1/3有義流量の最大値は表-1での最大流量と同値であり、 $Q_{1/3(\text{max})}$ が最も相関が高く、平均流量との相関が最も低い。このことから、河口近傍の地形は一度大きな流出があるとそれに支配された変化を呈することを示している。

図-6は、河口近傍の領域R6の土砂量変化とこれと最も相関の高かった河川流量の関係を示したものである。図-6で、ばらつきがみられるが、対象とする期間の河川流量が400 m³/s以下では領域R6は堆積し、流量がそれ以上になると侵食が生じている。冬・春期にかけての流量は通常400 m³/s以下の場合が多く、この時期の堆積は主として冬季風浪による河口砂州形成・伸長によるもので

表-2 領域R6での土砂量変化と流量の相関

流量データ	$Q_{1/3(\text{mean})}$	$Q_{1/3(1/3)}$	$Q_{1/3(1/10)}$	$Q_{1/3(\text{max})}$
相関	0.1723	0.2112	0.331	0.522

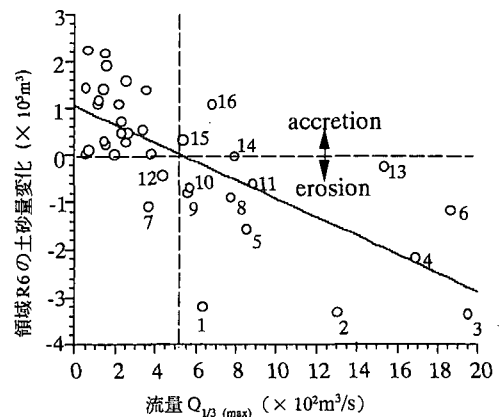


図-6 領域R6の土砂量変化と流量 $Q_{1/3(\text{max})}$ の相関

ある。また、 $400\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の最大流量が観測されるのは夏-秋季であり、この時に領域R6で生ずる侵食の要因には4つのタイプがあった。第1タイプは図-6中に番号を付したNo. 2 (76.3 -76.11), 3 (82.2-82.10), 4 (83.1-83.10), 6 (72.4-73.1) で流量 $1200\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の大出水による河口砂州のほぼ完全フラッシュによるものである。第2タイプはNo. 1 (66.3-66.10), 5 (74.7-74.11), 8 (79.3-79.10), 9 (77.10-78.3), 10 (84.2-84.10), 11 (64.9-65.7), 12 (69.2-69.12) で流量 $400\text{--}900\text{ m}^3/\text{s}$ の中規模の出水による砂州の側方侵食と小規模フラッシュによるものである。第3タイプはNo. 13 (65.7-65.12) で大出水にも関わらず砂州高さが比較的高いため(2-3 m), 完全崩壊に至らなかったことによる。第4タイプはNo. 7 (71.3-71.11) で砂州の崩壊なしに砂州の位置と形状の変化によるものである。

5. 流出流量による海域への土砂移動及び配分

流出流量による地形変化が最も激しい河口近傍の領域R6で侵食された土砂が流出流量によって海域のどこまで流れ、どこに配分されるかを検討するために、領域R6の侵食土砂量に対する各々の領域での土砂量変化の比較を行った。

図-7は領域R6の土砂量変化と負の相関が最も高かった領域R4との土砂量変化の比較を行ったものである。No. 2, 3, 4の場合は流量 $1,200\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の大出水が生じたケースで、R6で侵食された土砂が水深6-9 mの領域R4まで運ばれて、 $4\text{--}12\times 10^4\text{ m}^3$ 程度の土砂が堆積する。流量 $800\text{ m}^3/\text{s}$ で側方侵食及び小規模フラッシュが生じたNo. 5のように $12\times 10^4\text{ m}^3$ 程度の土砂が堆積するケースも見られる。しかし、No. 1では $600\text{ m}^3/\text{s}$ の出水で領域R6の侵食量が $1,200\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の出水を持つNo.

2, 3と同程度の $32\times 10^4\text{ m}^3$ が生じたが、この原因を推定することはできなかった。なお、大出水による砂州の完全フラッシュがもたらす海域への土砂輸送の一例を示したのが図-8である。

図-8の(a), (b)は図-7のNo. 3にあたる1982年2月と1982年10月の河口周辺地形図である。最狭部の幅が約50 mに至るまで砂州が伸張したが(図(a)), 日平均流量 $1,948\text{ m}^3/\text{s}$ に及ぶ大出水によってほぼ完全にフラッシュされ、河口中央と右岸側に向けて土砂が移動したことが図(b)から確認できる。表-3は、領域R6と各領域ごとの土砂量変化の相関を示しており、括弧内は両者の関係を直線近似した場合の傾きの正負を示している。

表-3より領域R4, R7の順に相関が高くなっていることが分かる。図-7から領域R6と領域R4の土砂量変化は傾きが負で、河口近傍の領域R6で土砂の侵食が大きいときに領域R4に土砂の堆積が起こっていることから、洪水流などの大出水の際、河口近傍の領域R6でフラッシュされた土砂は、河口中央の水深6-9 mの領域R4まで輸送され堆積することを示している。さらに、河

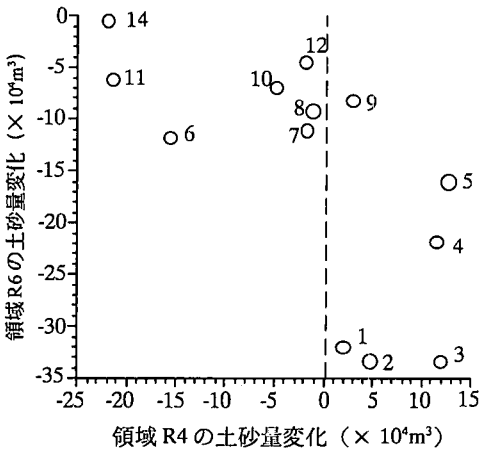


図-7 領域R6とR4の土砂量変化の比較

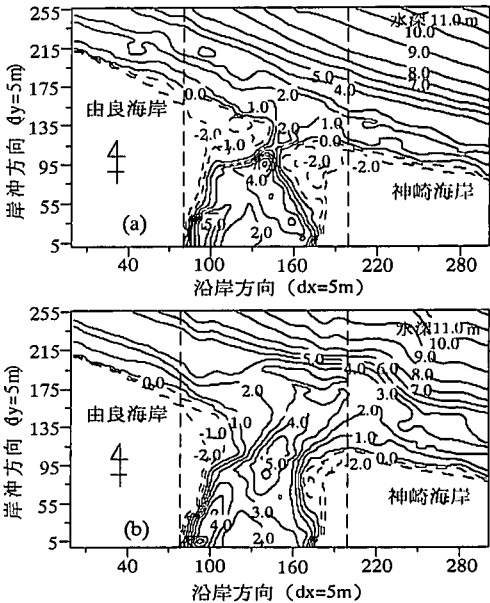


図-8 河口砂州のフラッシュに伴う土砂移動

表-3 領域R6の土砂量変化に対する領域ごとの相関

領域	R1	R2	R3	R4
相関	0.0786(-)	0.0667(+)	0.0528(-)	0.4244(-)
領域	R5	R7	R8	R9
相関	0.0306(+)	0.1129(-)	0.0019(+)	0.0232(-)

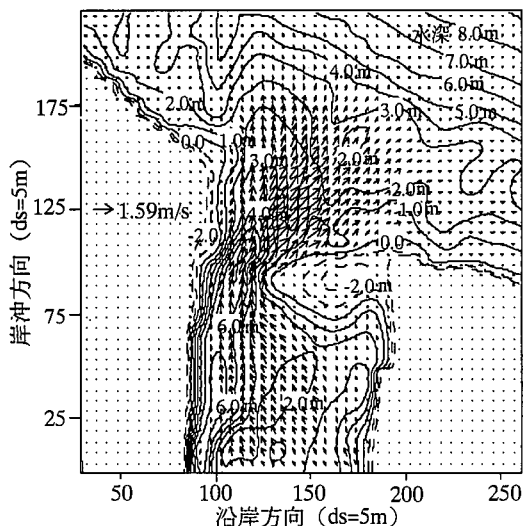


図-9 河口流出の出水計算例 (1965, 7月地形)

口右岸の水深6-9mの領域R7も比較的高く、水深6-9mの河口中央部だけでなく河口右岸にも堆積する。河口右岸から砂州が発達した状態での河口流出の計算を行ったところ(図-9, 流量400 m³/s), 流出流は海域で流向を右岸側に向けることが分かった。

また、流出流量が400 m³/s以下の場合は砂州側方の侵食、400 m³/s以上の出水の場合は砂州を越流し始め、砂州背後の水位上昇に伴い砂州のフラッシュが生じた。この際、流出流の流況は右岸砂州の影響によって偏流し、河口中央及び右岸向きの流れが発達した。領域R7における堆積にはこの流出流が影響しているものと考えられる。

6. 結 語

本研究で得られた主要な結果をまとめる。

1) 由良川の河口周辺において解析領域全体の1964年から1984年まで過去20年間の土砂量の経年変化計算結果、最大 $\pm 16 \times 10^6 \text{ m}^3$ の変動幅を有して堆積、侵食を繰り返しているが、1978年からは最大 $\pm 7 \times 10^6 \text{ m}^3$ の変動幅で1/2以上の減少を示し、顕著な侵食は生じていないことが分かった。

2) 河川流量に対する地形変動の敏感な応答を示す河口近傍の領域R6の土砂量の経年変化は一方向に堆積あるいは侵食を示さない。長期的に見るとR6の領域のみで土砂収支がとれている。

3) 由良海岸(領域R1, 2, 3)及び神崎海岸(R7,

8, 9)における汀線変動量と断面積変化量の間に顕著な相関は認められなかった。両海岸は沿岸漂砂が卓越するような海浜ではないことがわかった。また、経験的固有関数法による地形変動の解析では典型的な変動パターンを抽出することができなかった。

4) 由良川河口周辺地形の変動パターンは、冬-春期の河口砂州形成と夏-秋季の河口砂州フラッシュである。砂州は卓越波向に対応し、両岸から発達する確率が高いが、時として左岸あるいは右岸に発生することもある。

5) 土砂量変化と流量変化の相関解析結果、河口近傍のR6の土砂量変化と流量 $Q_{1/3(\max)}$ が最も相関が高く、平均流量との相関が最も低いことから、河口近傍の地形は最大流量に支配された変化を呈した。

6) 河川流量が400 m³/s以下を有する冬-春期では領域R6は主として冬季風浪による河口砂州形成・伸長によって堆積し、流量が400 m³/s以上の夏-秋季では侵食が生じた。領域R6で生ずる侵食の要因は4つのタイプに分けられた。第1タイプは流量1,200 m³/s以上の大出水による河口砂州のほぼ完全フラッシュによるものである。第2タイプは流量400-900 m³/sの中規模の出水による砂州の側方侵食と小規模フラッシュによるものである。第3タイプは大出水にも関わらず砂州高さが比較的高いため(2-3m)、完全崩壊に至らなかったことによる。第4タイプは砂州の崩壊なしに砂州の位置と形状の変化によるものである。

7) 洪水などの出水によって河口近傍の領域R6でフラッシュされた土砂は、河口中央の水深6-9mまで輸送され堆積するとともに河口右岸の水深6-9mの領域にも堆積した。これは深浅図の等深線を比べることと流出流の流況計算からも推定された。

謝辞: 本研究を行うための使用資料は建設省福知山工事事務所から提供頂いたもので、深く感謝すると共に深浅図の数値化作業を手伝ってくれた三井建設(株)の後藤隆志君に感謝する。また、この研究は文部省科学研究費補助金基盤研究A(No. 08650606)によって実施されたことを記して謝意を表明する。

参 考 文 献

- 田中茂信(1993): 海岸侵食, 海岸 Vol. 33, No. 1, pp. 57-61.
- 近畿地方建設局福知山工事事務所(1981): 由良川河口調査業務報告書.
- 日本気象協会関西支部(財)(1983): 宮津エネルギー研究所波浪・潮位解析業務報告書.