

吉野川下流域の長期地形変動

LONG-TERM TOPOGRAPHY CHANGE IN LOWER REACHES OF THE YOSHINO RIVER

中野 晋¹・岡部健士²

Susumu NAKANO and Takeshi OKABE

¹正会員 博(工) 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

²正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

Topography change over a period of 34 years since 1967 is analyzed statistically with respect to the most downstream reach of the Yoshino River, in Shikoku. A linear trend method (LTM) and an empirical orthogonal function method (EOFM) are utilized. As a result of the LTM analysis, contrary tendencies of topography change, namely rapid degradation and gradual aggradation of riverbeds, are described in regard to the periods before and after 1985, respectively. It is found that by the EOFM analysis that the first-order and the second-order modes of topography change are closely related to gravel digging and dam construction, respectively. Short-term prediction of topography change in a reach within 5km from the river mouth is carried out by means of extrapolation of eigen functions obtained by the EOFM.

Key Words: Yoshino River, topography change, dam, empirical orthogonal function

1. はじめに

吉野川の第十堰改築問題では徳島市民を中心とした住民運動が事業継続の可否を大きく左右した。一方、その過程で水工学に関する研究成果や知見を官学が住民にわかりやすく、かつ迅速に説明してきたかという点で反省すべき点は多い。旧建設省では直轄管理を行うようになった1966年度以降、定期的に河川横断測量を実施しており、その結果を用いると30年余の河床変動状況が解析できる。河川の治水面、環境面を考える上で河床変動特性の理解はその根本に係わる事項であり、河口環境を把握する目的からも著者ら^{1), 2)}は調べている。これまでに下流域の地形変動に限っても著者らのほかに大規模な模型実験から検討した加藤ら³⁾、空中写真と定期測量データを利用した宇多ら⁴⁾の研究があるが、過去30年の間に砂利採取の禁止、ダム群の竣工、砂防事業の進展、植生分布の変化など複数の人為的要因が絶えず変化しており、将来予測も含めた河床変動解析は困難な点が多い。しかし、いずれの研究でも1970年までの大量の砂利採取により、河床低下が短期間で進んだことを指摘している。

今回、1999年度末に4年ぶりに実施された定期横断測量結果も加え1966年度から1999年度までの合計22年分

の定期横断測量結果を基に経験的固有関数法(経験直交関数法)⁵⁾などの統計的分析を第十堰より下流区間(0~15km)を中心に実施し、河床変動の要因や短期的将来予測について検討した。

2. 対象河川と解析方法

吉野川は、四国西部に位置する高知県土佐郡本川町の瓶ヶ森にその源を発し、四国の中央部を四国山地に沿って東に流れ、豊永から向きを北に変え四国山地を横断し、銅山川・祖谷川等を合流した後、池田町(80km地点)からは中央構造線に沿って東に流れ、流量基準点・岩津(40km)を通過、第十堰(14.5km地点)で一部を旧吉野川に分流した後、徳島市で紀伊水道に注いでいる(図-1)。河川流路延長は194kmであるが、河口から77.8km地点の池田ダムまでが国の直轄管理区間となっており、定期的に河川横断測量が実施されている。本研究で利用したのは1966年度から1999年度までの測量データであり、欠測年度(1967~1970, 1976, 1985, 1991, 1993, 1994, 1996~1998)があるため、データ数は22年分である。なお測量は年度末に実施されているので、測量年としては1967~2000年として表記し、河床位の基準高には

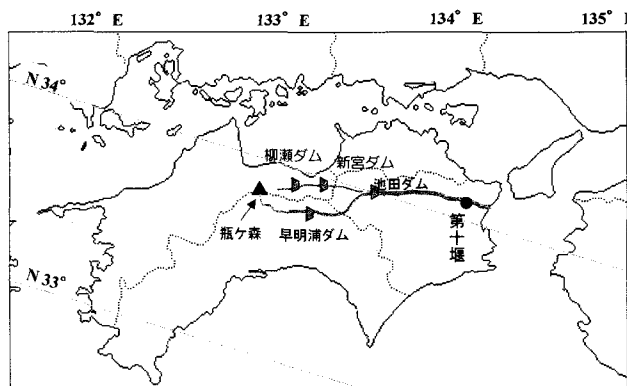


図-1 吉野川の概略図

東京湾中等潮位 (T.P.) を用いる。

横断面内においては、橋脚や河川敷上に障害物があれば測量できないため、測量間隔は不等間隔であり、年ごとの測点が統一されていない。しかし、各地点の河床位の経年変化を調べるためには全測量期間を通して、測点位置が同じであることが望ましい。そこで、各断面内を100等分し(各断面内の節点数は101個)、河床位評価位置が解析対象期間を通して一致するよう原データから河床位を内挿補間して求めた。なお、測量は河口0km地点から77.8km地点まで200mおきの390断面で実施されているが、この内、0～15kmの下流域に関して主成分分析法の1つである経験的固有関数法(以下EOF法と呼ぶ)による分析と線形トレンド解析を行い、30年余りの地形変動特性について調べた。

EOF法解析では時間方向に不等間隔データでも解析できるが、等間隔データの方が解析結果の信頼性が高くなるため、欠測年データは前後の測量データから線形内挿して求めている。また本研究では従来から良く用いられる実数値型の3次元経験的固有関数法(たとえば加藤ら⁵⁾)を適用する。

ある測量年 t の河床位を $z_b(x, y, t)$ 、全測量期間平均の河床位を z_b とすると、平均河床位からの変動量 z_b^* は

$$z_b^*(x, y, t) = z_b - \bar{z}_b = \sum_{i=1}^n c_i(t) e_i(x, y) \quad (1)$$

で表される。ここで、 t は測量年、一方、 x, y は測量期間を通じて同一位置を示す一種の格子番号、 $c_i(t)$ は時間的な固有関数、 $e_i(x, y)$ は地形データから経験的に得られる空間的な固有関数である。ここで両者はお互いに直交する関数でなくてはならない。 $c_i(t)$ と $e_i(x, y)$ は寄与率の大きい順にモード1について c_1, e_1 、モード2について $c_2, e_2 \dots$ と呼ぶことにする。

一方、線形トレンド解析では同一地点のある一定期間の河床位データから最小自乗法により、線形回帰係数を

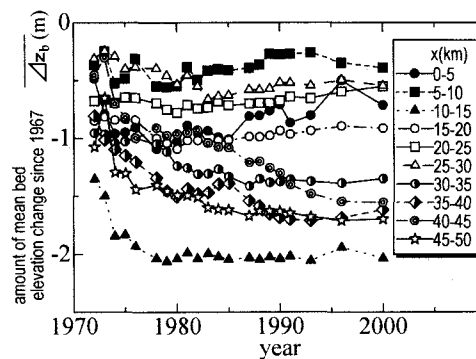


図-2 平均河床位の経年変化

求めて年平均の河床上昇速度を評価した。

3. 河床変動状況とその要因

(1) 地形変化の概要

はじめに河口より50km地点までの低水路内平均河床位の変化状況を図-2に示す。1967年の平均河床位を基準にして各年の平均河床位の変化を示しており、過去約30年の河床変動状況の概要がわかる。いずれの区間でも1980年頃までに最大2mの急激な河床低下が生じ、それ以後は現在まで河床位変化は穏やかになっている。1980年以降だけを見ると河床位変化は0～30kmがほぼ一定あるいは緩やかな上昇傾向、30～50kmが緩やかな低下傾向を示している。また1985年以降は0～5km区間の河床上昇と35～45km区間の河床低下が特に顕著となっている。

図-3は河口部の0～15kmの各地点を対象に、平均河床の上昇が始まった1985年以降とそれ以前の両期間について、線形回帰より平均河床上昇速度を求めたものである。なお、地形との関係がわかるように2000年の河床位分布を最下段に示している。現在、0.4kmから1.8km付近の右岸側に沿って河口砂州が形成されている。この砂州も1975年以前には先端が海側に張り出していたが、河床低下の進行とともに河道内に後退し、現在の位置で概ね安定している^{11,2)}。従って河口から2km間の変動は河口砂州の移動の影響が大きい。1985年以前と以降について全体的な傾向を見ると明らかに河床低下速度の大きな所が減少して、広い範囲で河床上昇傾向が強まっていることが読み取れる。

河床変動が大きく、近年、河床上昇が顕著になっている0～5km区間の横断面河床位の経年変化を図-4に示す。0km断面では1970年代の砂州後退により、一時中央より左岸側で5m以上も河床低下が生じたが、1980年以降、確実に堆積しており、特に左岸沿いの滞筋の河床上昇が顕著となっている。1km断面は河口砂州のため、最も流水部が狭くなっている。そのため、洪水や波浪による侵

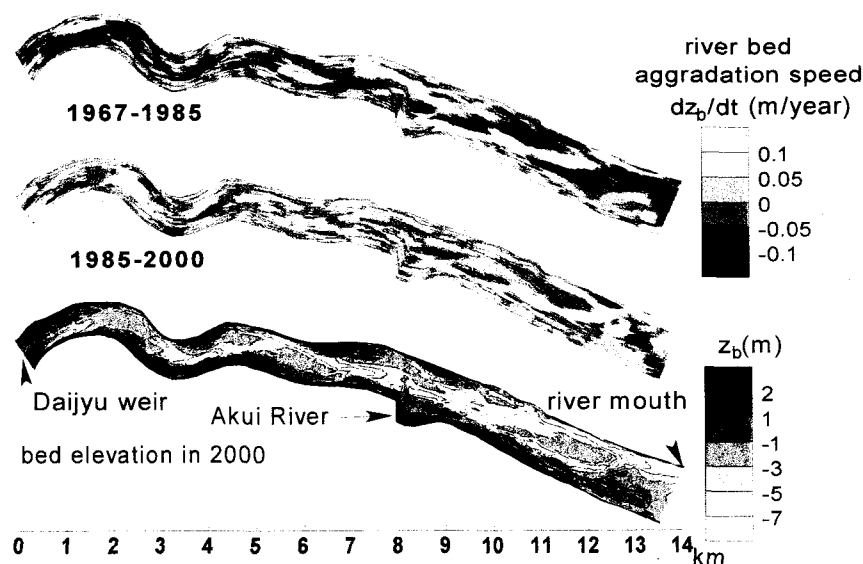


図-3 平均河床上昇速度

食の影響を受けやすく、地形変化が激しい。ここでも近年左岸沿いの最深部で堆積が進んでいる。2km と 3km 断面では滞筋が二手に分かれ、左岸と右岸に沿って形成されており、その間に水深 1~4m の浅瀬が広がっている。1991 年以降、これらの浅瀬が右岸方向に少しずつ拡大しながら移動する傾向が見られる。4km と 5km 断面ではいずれも 1967 年に比べると起伏が小さくなっている。特に 1967 年には右岸沿いに滞筋が形成されていたが、この部分の堆積が見られ、流路の変動があったことがわかる。

(2) 経験的固有関数法を用いた解析結果

図-5 および図-6 に 1967~2000 年の 34 年分の測量データ（欠測年データは補間）から算出された空間固有関数 e_i と時間固有関数 c_i を示す。各モードの寄与率は表-1 の通りであり、モード 1 は 53.2% と河床変動現象のおよそ 1/2 を表し、モード 4 までの累計で 83.6%，さらにモード 7 までの累計で変動量の約 88% を表現できることがわかる。

式(1)より、河床変動量 z_b^* は c_i と e_i の積で表されるため、 $e_i > 0$ の地点では $dc_i/dt > 0$ の場合に河床上昇傾向、 $dc_i/dt < 0$ の場合に河床低下傾向である。一方 $e_i < 0$ ではこれと逆の関係がある。

図-5 を見ると、モード 1 の e_1 は図-3 の 1967~1985 年の平均河床上昇速度と良く対応しており、河床低下速度が大きい所で正、河床上昇地点で負となっている。モード 2 は滞筋周辺で負値となっているが、図-3 の 1985 年以降の河床上昇地点と概ね一致している。

一方、図-6 の時間固有関数 c_i を見ると、1980 年以前に 1 回または 2 回変曲した後、ほぼ一様な増加または減少傾向を示している。これは 1980 年以降、それまでに比べて大きな擾乱がなく、地形変動が単調かつ小さくなっていることを示している。

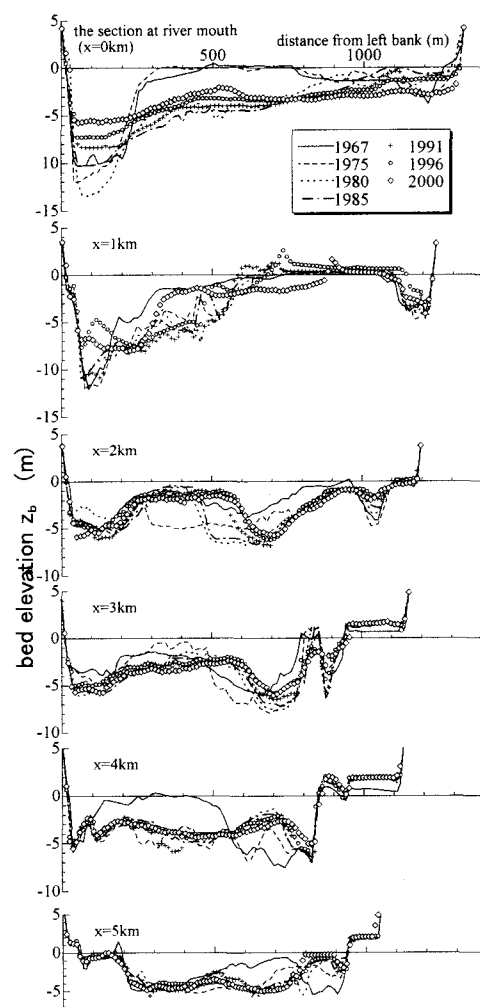


図-4 河口部の横断面形状の経年変化

c_1 は 1978 年頃まで急激に減少するが、それ以降、減少の程度は緩やかとなっている。図-5 の説明で述べたようにモード 1 は 1985 年以前の河床上昇速度と逆相関で

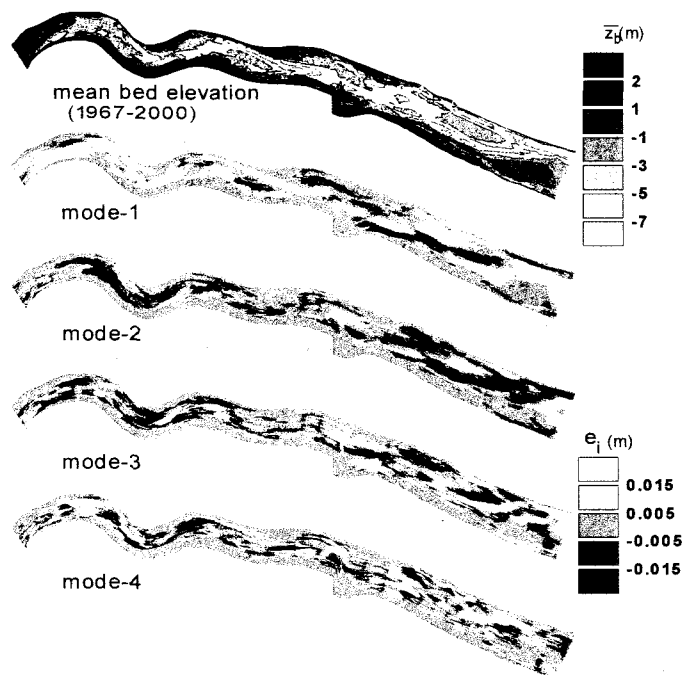


図-5 空間固有関数の分布

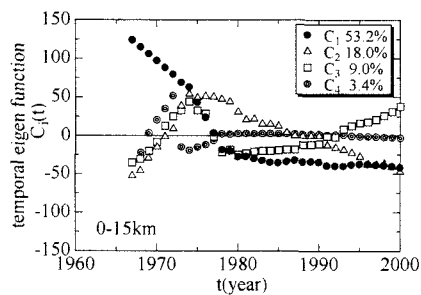


図-6 時間固有関数分布

表-1 各モードの寄与率

モード	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)
1	53.2	53.2
2	18.0	71.2
3	9.0	80.2
4	3.4	83.6
5	2.1	85.7
6	1.7	87.4
7	1.5	88.9
8~34	11.1	100.0

あり、これは1980年以前に c_1 が急減していることと対応している。これよりモード1は1980年までにほぼ完了した事象による河床変動を表すモードと考えられる。

モード2の c_2 は1976年に最大となった後、ほぼ様な勾配で減少を続けている。 e_2 は滞筋周辺で負の値をも

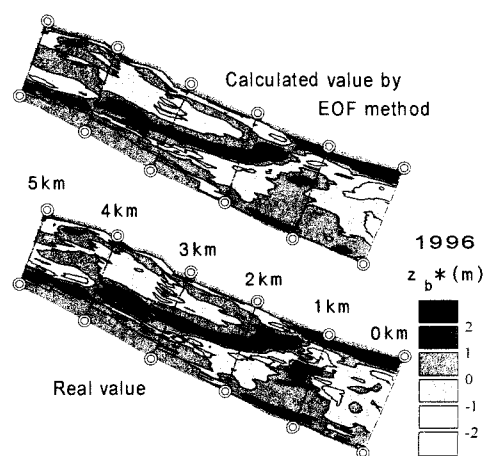


図-7 EOF法による計算値と実測値の比較（等水深図）

つため、1976年までは滞筋部で河床低下が生じ、その後堆積傾向に転じたことを示している。

なお、寄与率の小さいモード3以上については明確な特徴は見出しにくい。

EOF法により求めた河床変動量 z_b^* の近似精度を図-7で確認する。これは地形変動の再現状況を等高線図で見たもので、第7次モードまで考慮した近似値となっている。これらの図から単年度の局所地形を表現するという意味では不十分であるが、長期的地形変動の傾向を把握するという目的のためにはEOF法は有効な手法と考えられる。

(3) 河床変動の要因についての考察

線形トレンド解析および EOF 解析により吉野川下流部の長期地形変動特性がある程度把握された。そこでこの変動要因について、近年の土砂供給量変化の点から考察する。

吉野川上流に建設されているダム堆砂量と砂防ダム堆砂量について検討する。吉野川上流部には早明浦ダム(計画堆砂量 1700 万 m^3 , 1978 年竣工), 池田ダム(同 825 万 m^3 , 1975 年竣工) 柳瀬ダム(同 260 万 m^3 , 1953 年竣工), 新宮ダム(同 90 万 m^3 , 1976 年竣工) の 4 ダムが建設されており, ダムへの堆砂が続いている。ダム堆砂量は年変動が大きいので, そのままでは長期的な経年変化が掴みにくい。そこで年間ダム堆砂量の 9 年移動平均を求めた。図-8 は年間ダム堆砂量, 河口～池田ダムまでの 77.8km 区間に流入する支川周辺で実施された砂防ダムへの堆砂量, 同区間における砂利採取許可量についてまとめたものである。なお, 砂防ダムの堆砂量は実際の堆砂量に関するデータがないため, 次のように推計している。徳島県土木部砂防課より 1975 年度から 1996 年度までに竣工した砂防ダムの場所, 河川名, 計画堆砂量の記録を入手し, 竣工後に毎年均一に堆積し, 5 年間で満砂状態に達するという大胆な仮定を行い, 各年の堆砂量を評価した。そのため, 過大評価になっている可能性があり, 注意を要する。また土砂供給量の評価のためにはダムなどへの堆砂量とともに流域での土砂生産量を評価することが重要である。特に 1975 年と 1976 年には吉野川右岸支川の貞光川、穴吹川上流の剣山周辺で台風に伴う豪雨による大規模な山腹崩壊が生じ、大量の土砂が生産されている。特に 1976 年の 17 号台風では 6 日間にわたり剣山周辺で 2000mm を超える集中豪雨があり、穴吹川河道には 188 万 m^3 の土砂が堆積したと杉尾ら⁷⁾は報告している。このような大規模な土砂災害による土砂生産は当然、その後の吉野川下流部の地形変動に影響を与えているが、土砂生産量の経年変化に関して現時点で利用できる定量的なデータがほとんどないため、本研究の中では考慮していない。

この図より以下の重要な事項が読み取れる。

- ①1960 年代後半は砂利採取により, 年間 200 万 m^3 を超える土砂が河川外に持ち出されていた。
- ②1970 年代は砂利採取量の低減とダム堆砂量の増加がほぼ同じで, この間は人工的に土砂供給量が年間 150 万 m^3 程度低減されている。
- ③1980 年以降, ダム上流部での砂防事業の効果によりダム堆砂量が減少したため, 人工的な土砂供給の低減は単調に減少し, 1980 年から 1995 年の 15 年間で約 1/3 となっている。

EOF 法による解析で得られたモード 1 は 1985 年以前の河床低下と相関が高いことをすでに述べたが, 時間固有関数 c_1 と砂利採取許可量の変化の状況が一致することから, 砂利採取量の影響を表す因子と推定される。

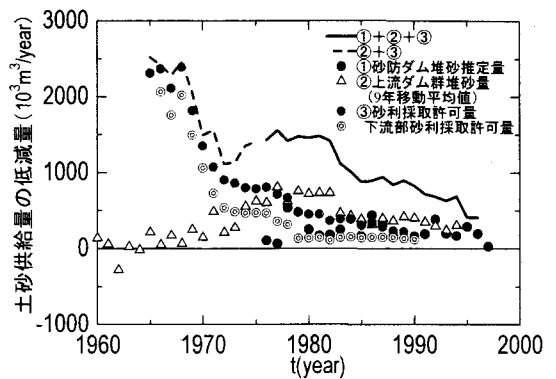


図-8 土砂供給量の年間低減量

一方, モード 2 は 1975 年を境に滞筋部で侵食から堆積に転じるなど本河川で生じた大きなイベントの存在を感じさせる。最も考えられるのは池田ダムと早明浦ダムが 1975 年, 1978 年と完成し, 洪水調節機能を発揮し始めるとともにダムの年間堆砂量がこの時期最大となったことであろう。特に前者は洪水のピーク流量をカットすることにより, 滞筋の侵食を低減する効果を発揮したことが考えられる。また年間ダム堆砂量の経年変化傾向と c_2 が良く対応していることからこのモードはダムの建設によるピーク流量の減少とダム堆砂量に関係の深い因子であると考えられる。

上述したように c_1 で表される砂利採取による河床低下が概ね 1985 年に終了し, c_2 で表されるダム建設の影響が 1978 年以降ほぼ一様に河床変動に寄与する結果, 河口部の広い範囲で 1985 年前後には河床低下から河床上昇に転じている。この時期の人為的な土砂低減量を図-8 で見ると年間 75~100 万 m^3 程度である。1995 年以降の人為的な供給土砂低減量が得られていないが, 線形的なトレンドを仮定すると現在は 1985 年頃の半分以下の 40 万 m^3 程度になっていると推測される。このため 1985 年頃に比べると年間 50 万 m^3 以上, 土砂供給量が増加した結果, 最近特に河床上昇が顕著になってきたものと考えられる。

4. 短期将来予測

過去 30 年余りの地形データの統計的分析により, 吉野川河口部では 1985 年以降, 河床上昇が生じていることが明らかになった。河床上昇は治水の安全度を低下させるだけでなく, 汽水域の環境問題にも重大な影響を与えることになる。そこで, 今回用いた統計的手法を拡張して適用し, 河口地形の短期将来予測を実施する。

EOF 法により求めた 1990 年~2000 年の c_i ($i=1\sim7$) から線形回帰式を作成した後, 2005 年に対する c_i を外挿により求め, 式(1)から各地点の河床位の変動量を求めた。

図-9 に 0~5km 区間について予測した等深線図を示す。

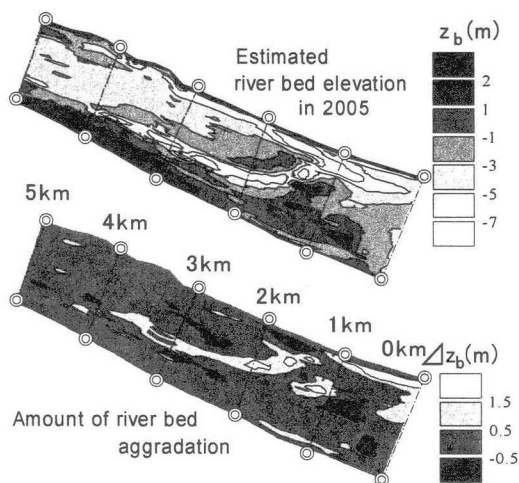


図-9 河口地形短期将来予測による等深線図

上側の図が2005年の河床位、下側の図は2000年からの河床上昇量 $\Delta z_b (= z_b(2005) - z_b(2000))$ を示す。これによると0～1km区間の左岸に沿った滞筋と河口砂州の北西側滞筋で最大1.5m以上となる堆積があると予測されている。一方、砂州の海側の一部などで侵食地点が示されている。地形変化が大きいと予測された1～3km断面の河床位変化を図-10に示す。特に0km断面では現在までの傾向が大きく変わらないと仮定すれば左岸沿いで1m以上河床が上昇する可能性があり、流水断面積の減少による洪水疎通能力の低下に注意を払う必要がある。

5. おわりに

本研究で明らかになった主要な事柄を列举すると以下のようである。

- (1) 河口から50km地点までの平均河床位は1980年頃までに最大2mの急激な河床低下が生じた後、それ以後は穏やかな変化となっている。その中でも0～5km区間では1985年以降に河床上昇が顕著になっている。
- (2) EOF解析を用いて下流域の河床変動要因を調べた結果、モード1の寄与率は約50%、モード2は約20%である。モード1は主に1980年以前の河床低下を表し、砂利採取量と関係の深い因子である。一方モード2は1975年を境に堆積と侵食の傾向が変化することや年間ダム堆砂量と関係が深いことから上流ダム群の建設とダム堆砂量に關係するモードであると推察された。
- (3) EOF解析とトレンド解析により下流域地形の短期将来予測を行い、2005年には河口砂州周辺の滞筋を中心に河床上昇が起こる可能性が指摘された。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（基盤研究 C-2, #13650569, 代表：中野晋, 基盤研究 C-2, #11650531,

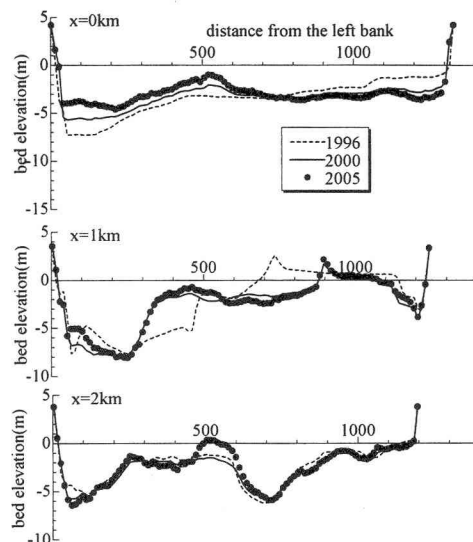


図-10 河口地形短期将来予測による横断面形状

代表：岡部健士, 基盤研究 B-2, #11480143, 代表：徳島大学・鎌田磨人), 河川環境管理財団河川整備基金(13-1-4-26, 中野晋)の補助を受けておこなわれた。また徳島大学・端野道夫教授からは豪雨に伴う土砂生産について貴重な助言を頂いた。

さらに定期横断測量データや流量データ等, 本研究を行う上での基礎データは国土交通省四国地方整備局徳島工事事務所から提供いただき、砂防ダムに関する資料は徳島県土木部（現県土整備部）砂防課より提供いただいた。ここに記して各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 中野晋, 藤井勇, 河井裕輔, 北野利一, 三井宏: 吉野川河口地形の経年変化と大出水時の地形変動シミュレーション, 徳島大学工学研究報告, 43, pp. 45-55, 1998.
- 2) 中野晋, 北野利一, 藤川美和: 吉野川下流部の地形変動と洪水による河口砂州変形計算, 海岸工学論文集, 46, pp. 641-645, 1999.
- 3) 加藤一正, 田中則男, 木村久雄, 赤石正廣: 大河川河口部周辺の移動庄模型実験, 港研報告, 22(2), pp. 3-87, 1983.
- 4) 宇多高明, 川崎俊太, 加藤健一: 吉野川河口砂州の後退・縮小原因について, 海岸工学論文集, 42, pp. 576-580, 1995.
- 5) 加藤一正, 吉松晃: 三次元の経験的固有関数法による深淺図解析法, 港研報告, 23(2), pp. 27-47, 1984.
- 6) 須賀堯三: 河口問題と現地調査, 1972年度水工学に関する夏期研修会講義集, pp. A6-1-A6-18, 1972.
- 7) 杉尾捨三郎, 端野道夫, 岡部健士: 吉野川支川溪流河状調査に関する研究、第二章、昭和 51 年度受託研究成果報告書, pp. 4-14, 1977.

(2002. 4. 15 受付)