

# 吉野川河口における河床変動要因の解析

## ANALYSIS OF FACTORS WHICH CONTRIBUTE TO RIVER-BED VARIATION AT YOSHINO RIVER MOUTH

宇野宏司<sup>1</sup>・中野晋<sup>2</sup>・辻本剛三<sup>3</sup>・柿木哲哉<sup>4</sup>

Kohji UNO, Susumu NAKANO, Gozo TSUJIMOTO and Tetsuya KAKINOKI

<sup>1</sup>正会員 博(工) 神戸市立工業高専助手 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南三島町2-1)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 神戸市立工業高専教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 神戸市立工業高専助教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

To clarify the contributing factors for river-bed variations, numerical simulation and statistical analysis were conducted. The study site is the Yoshino river mouth, Shikoku island, Japan. At first, under the unsteady flow condition, 1-D numerical simulations on river-bed variations were carried out and the reproducible results were obtained. Secondary, the empirical eigenfunction was applied to the simulation results and survey data, respectively. Finally, contributing factors for river-bed variations were estimated by principal component analysis. Main results are as follows; 1) The results of numerical simulation agree well with the topographic data, except for some local scouring spots and 0-2km section. 2) The first principal component which is obtained by EOF analysis reflects the effect of cross-shore sediment transport. 3) The river-bed variation at the Yoshino river-mouth can be described by using top three principal components.

*Key Words* : cross-shore sediment transport, empirical eigenfunction, Yoshino river

### 1. はじめに

河川の総合的な維持管理にあたっては、大規模出水等のcatastrophicな状況を想定するだけでなく、中長期的な視点に基づいて対象河川の変遷を把握し、適当な対策を講じていく必要がある。そのためには、これまでに蓄積された測量データ等を解析し河床変動に寄与する因子を明らかにすることが重要であるが、具体的な解析方法や予測手法の確立には多くの課題を残している。

特に河川と海岸が接続する河口域は、河川改修や流域開発等の人為的なインパクトと、洪水、潮汐、波浪等の自然現象によるインパクトが複雑に絡み合うため、河口地形に寄与する因子を抽出することが困難な状況にある。

加藤・吉松<sup>1)</sup>、中野・岡部<sup>2)</sup>は、測量データをもとに経験的固有関数法を用いて、地形変動の因子分析を行い、その有用性を確認している。しかし、将来施策を検討するにあたっては、数値シミュレーション結果に対する同手法の有効性を確認しておくことも必要である。

本研究で対象とする吉野川河口域では、現在、東

環状大橋の建設工事が進行しているほか、第十堰改築問題や、四国横断道路橋の建設、沖洲流通港湾2期工事が計画されている。また、人為的なインパクトに加え、近年では、地球温暖化の影響による海水準上昇が河口域の生態系等に及ぼす影響も懸念され始めている。徳島県近海においても、年間5.5mmの速度で海水準面が上昇しているとの報告<sup>3)</sup>がある。河口域の環境への影響に対する地域住民の関心は非常に高いものとなっており、工学的・科学的立場からの説明責任が求められている。

このような社会的背景を踏まえて、本研究では、河口域における中長期的なトレンドを評価する一手法として、比較的計算負荷が小さい一次元河床変動解析結果を対象に統計的解析手法を適用し、河口域の変動に寄与する因子の抽出とその影響度を定量的に把握することを試みた。

### 2. 一次元河床変動計算モデル

#### (1) 計算モデルの概要<sup>4),5)</sup>

本モデルでは陰形式差分法で不定流計算を行い、各地点の時々刻々の水位を求め、これをもとに摩擦

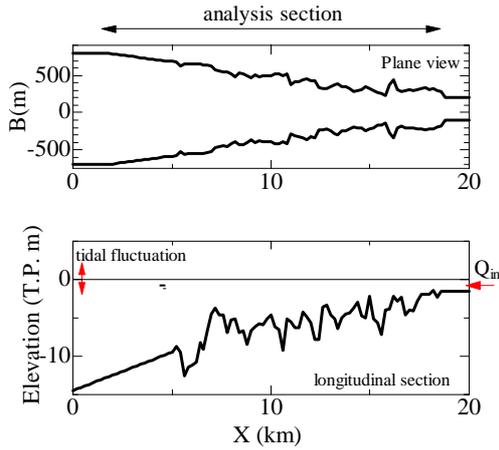


図-1 計算地形

速度を評価し、河床変動量を計算する。

陰形式差分法による不定流計算では、 $\Delta x$ 、 $\Delta t$ の大小に関わらず計算が安定するという特長をもつため、中長期的な計算をする場合に有利である。

不定流計算における流れの基本方程式は、式(1)、(2)であらわされる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{k^2} = 0 \quad (2)$$

ここに、 $A$ ：通水断面面積、 $t$ ：時間、 $Q$ ：流量、 $x$ ：下流向きを正とする距離、 $k^2$ ：通水能である。

河床変動計算では、河床材料及び流砂は混合砂礫を対象とした。また流砂形態は掃流砂及び浮遊砂を対象とした。掃流砂量の算出には粒径別の芦田・道上の式を用いた。一方、浮遊砂の河床からの浮上量については、板倉・岸の式を用いた。

粒径別流砂の連続式は、交換層における粒径別の流砂の交換、河床の変動及び河床変動に伴って新たに交換層に加わる粒径分布を考慮し、次式で表される。

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i^* \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{1}{B} \frac{\partial (q_{Bi} B)}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} c_{bi} \right] = 0 \quad (3)$$

ここに、 $p_i$ ：粒度構成比、 $\delta$ ：交換層厚さ、 $\lambda$ ：河床材料の空隙率、 $q_{sui}$ ：粒径別浮遊砂の単位面積当たりの河床からの浮上量、 $q_{Bi}$ ：粒径別掃流砂量、 $w_{fi}$ ：粒径別浮遊砂の沈降速度（Rubey式より算出）、 $c_{bi}$ ：河床付近の粒径別浮遊砂濃度である。なお、式(3)の  $p_i^*$  に関しては、河床上昇の場合には流砂中における粒度構成  $p_i$  を、河床低下の場合には初期河床での粒度構成  $p_{i0}$  を与えることとした。

また、全流砂の連続式は全ての粒径の流砂の交換を考慮し、次式で表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{1}{B} \frac{\partial \sum_i (q_{Bi} B)}{\partial x} + \sum_i (q_{sui} - w_{fi} c_{bi}) \right] = 0 \quad (4)$$

表-1 計算条件

計算ケース	上流端流量	下流端水位	砂利採取	流砂形態	
				掃流砂	浮遊砂
case01					
case02					
case03			×		
case04		×	×		
case05	×		×		

ここで、 $\Sigma_i$  は粒径別の量を合計した量である。

黒木ら<sup>6)</sup>によれば、安定した河床変動計算を行うためには、時間及び空間方向の計算刻みが次式の条件を満たす必要があるとされている。本モデルの不定流計算では陰形式をとるため  $\Delta t$  の制約を受けない。したがって、式(5)が本モデルの  $\Delta t$  の制約条件となる。

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \min \left[ \left( \frac{dx}{dt} \right)_{pi}^{-1} \right] \quad (5)$$

ここに、

$$\left( \frac{dx}{dt} \right)_{pi} = \frac{-1}{B\delta(1-\lambda)} \left[ \frac{\partial (q_{Bi} B) / \partial x}{\partial p_i / \partial x} + Q \frac{\partial c_i / \partial x}{\partial h / \partial x} \right] \quad (6)$$

(2)モデルによる中長期的な河床変動の再現性

本モデルによる中長期的な河床変動の再現性を確認するため、吉野川河口での河床変動の再現計算を行った。初期断面形状（川幅、河床高）は、1966年の横断測量データより図-1のとおり設定した。計算条件は、表-1に示す5ケースとし、上流端流量、下流端水位、砂利採取の有無、流砂形態が地形変動に与える影響を把握することを試みた。計算期間はいずれも1966～2002年の37年間である。中野・岡部<sup>2)</sup>によれば、吉野川河口域では近年、澇筋を中心に顕著な河床位の上昇が見られると報告されている。そこで、本研究では河床位について各断面の澇筋に相当すると考えられる最深河床位を用いることとした。

河床材料の初期粒度分布は、10、50、90%粒径を与え、対数正規分布になるように内挿して分布を与えた。ここで、50%粒径は、各断面の平均水深から求まる移動限界粒径と同等になるよう設定した。また、10%、90%粒径はそれぞれ50%粒径の1/10、2倍とした。

不定流計算では、境界条件として上流端流量と下流端水位を設定する必要がある。そこで上流端流量は、流量年表より中央橋（N34°05'25"、E134°20'52"）の日流量を与えた。また、下流端水位は、吉野川河口に最も近い小松島港での実測潮位を与え、欠測の場合は推算潮位で補間した。

浮遊砂は上下流端で動的平衡状態であるとして、次式に示す平衡浮遊砂濃度を与えた。

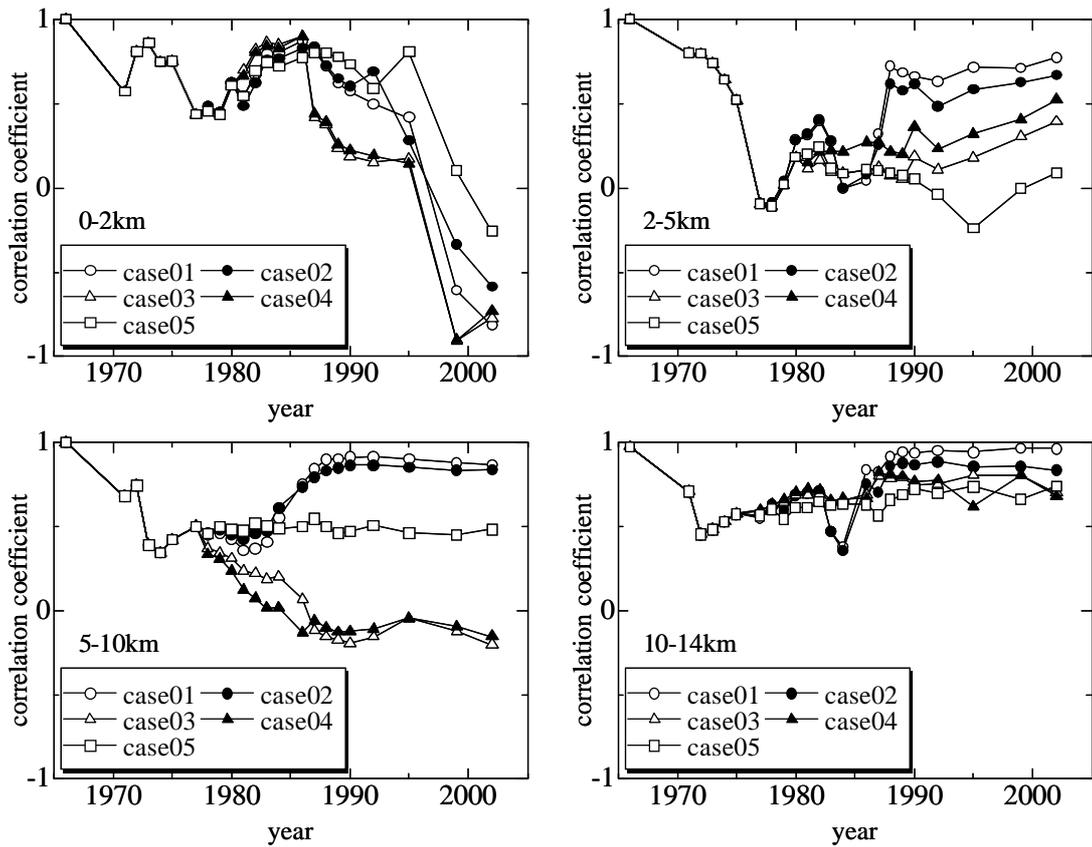


図-2 区間別の相関係数

$$\langle c_i \rangle = \frac{q_{sui}}{w_{j1}\beta} (1 - \exp(-\beta)) \quad (7)$$

ここに、 $\beta = w_{j1}h/\varepsilon$  ( $\varepsilon$ は水深平均の拡散係数でカルマン定数 $\kappa$ を用いて、 $\varepsilon = u_*h/6$ )と表される。

図-2は区間ごとに各計算ケースの計算結果と実測データとの相関係数を時系列でプロットしたものである。0-2km区間では、いずれの計算ケースも1990年以降に相関が著しく低くなっている。しかし、case01とcase02については、0-2km区間を除いては全期間にわたり相関係数0.6以上を保っており、実現象をかなり簡略化した次元モデルとしては比較的良好な再現結果が得られている。

case03とcase04については、5-10km区間においても相関が著しく低くなっている。各計算ケースはcase01の計算条件から、砂利採取、上流からの河川水供給といった因子を除いて計算したものであり、今回の計算結果からは、これらの因子が地形変動に強く影響を与えていることがわかる。一方、case05は潮位変動が河床変動に及ぼす影響を調べたものであるが、相関係数の低下具合からみても、砂利採取や上流からの河川水供給に比べてその影響は小さいと考えられる。

図-3は今回の計算ケースで最も相関の高かったcase01について、河床位の遷移を約10年ごとにみたものである。1980年代までは、河口域全般にわたって高い再現性が得られている。これは河床そのもの

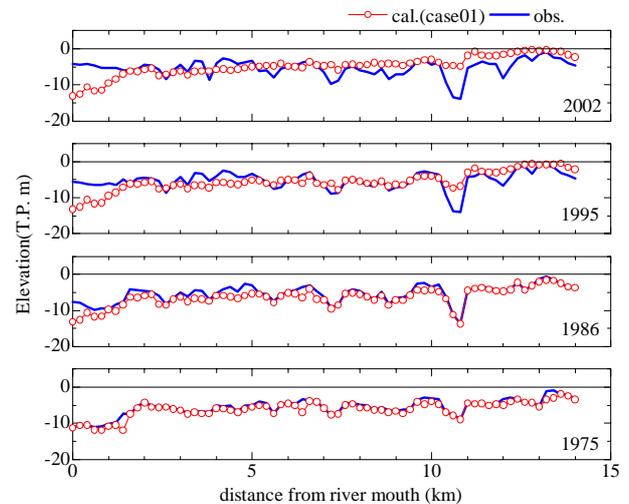


図-3 河床変動計算結果と実測値との比較 (CASE01)

が計算当初と比べ大きく変化していないということ、計算における砂利採取の扱いが最深河床位の浅いところから多く採取するように仮定したため、この計算処理が結果的には計算結果と実測データの誤差を埋め合わせる方向に働いている可能性が考えられる。砂利採取については、量的な情報を把握できているものの、採取場所等の空間情報が欠落しているために、この取り扱いには注意が必要である。

また、1995年以降では、計算値の方が実測値よりも10-15km区間で堆積、0-2km区間で侵食する傾向が強く出ており、掃流砂量がやや過小に評価されてい

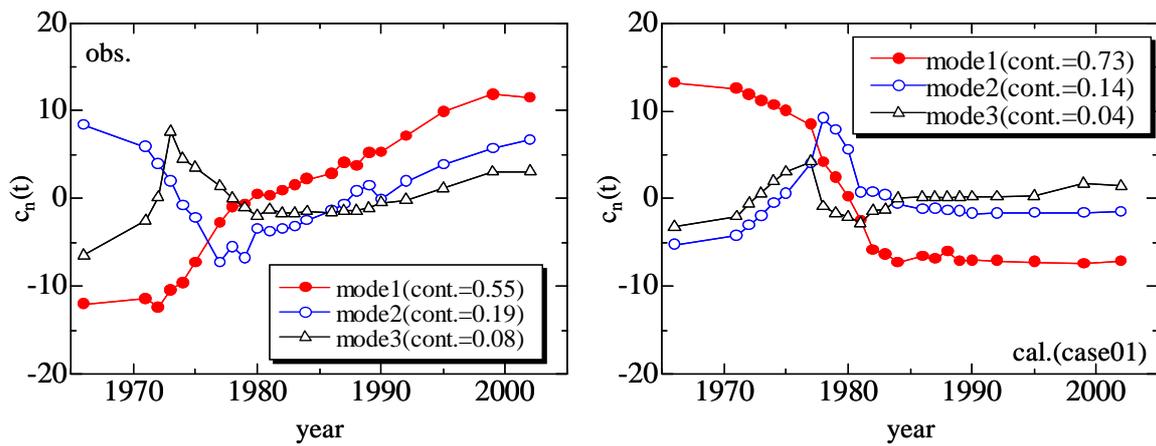


図-4 時間関数の比較 (実測値, 計算値 (case01))

る可能性も考えられる。特に本モデルでは岸沖方向の沿岸漂砂を考慮していないために、0-2km区間の沖側からの土砂供給に起因すると考えられる河床上昇が再現できていない。

以上のことから本モデルでは岸沖方向の漂砂や局所洗掘を再現できていないことに注意する必要があるものの、2-10km区間ではある程度の再現性を得ることができた。

### 3. 経験的固有関数法を用いた河床変動要因の抽出

#### (1) 経験的固有関数法の概要

加藤・吉松<sup>1)</sup>、中野・岡部<sup>2)</sup>は、実測データを対象に経験的固有関数法を用いた地形変動の要因分析を実施し、その有用性を確認している。

経験的固有関数法には変動現象の進行波成分とその位相関係を把握するための複素値解析と定常波を対象とする実数値解析の2種類があるが、ここでは従来から良く用いられる実数値型の2次元経験的固有関数法を適用した。

いま、ある測量年  $t$  の河床位 (本研究では、定期横断測量データの各断面の最深河床位とする) を  $z_b(x, t)$  とする。全測量期間平均の河床位を  $\bar{z}_b$  とすると、平均河床位からの変動量は

$$z_b^*(x, t) = z_b(x, t) - \bar{z}_b(x) \quad (8)$$

で表される。ここで、 $t$  は測量年、 $x$  は測量期間を通じて同一位置を示す一種の格子番号に相当する。これを時間方向の固有関数  $c_i(t)$  と空間方向の固有関数  $e_i(x)$  を用いて

$$z_b^*(x, t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) e_i(x) \quad (9)$$

と表現する。ここで  $e_i(x)$  は対象とする地形固有のものであり、データから経験的に得られるものである。 $c_i(t)$  と  $e_i(x)$  は寄与率の大きい順に第1次モード  $c_1, e_1$ 、第2次モード  $c_2, e_2 \dots$  と呼ぶことにする。なお、解析方法の詳細は加藤・吉松<sup>1)</sup>の論文を参照

されたい。

#### (2) 経験的固有関数法による河床変動要因の検討

河口付近の河床変動の特徴を抽出するため、国土交通省の定期横断測量データ及び前節の計算結果に対し、経験的固有関数法を用いた主成分分析を行った。解析対象区間は0-14kmである。前節の河床変動計算では初期河床位は各断面の最深河床位としたため、実測データの解析においても、各断面の最深河床位を用いることとした。

図-4は寄与率の大きい順に3つの主成分の時間固有関数を示したものである。1966~2002年の河床変動量は、第3主成分までを考慮することにより実測値に対し82%程度、計算値に対し90%程度以上が表現できている。

時間関数の第1主成分を比較すると、実測値と計算値で逆の傾向が見られ、実測値に対する第1主成分は単調な上昇を示すのに対し、計算値に対する第1主成分は単調な下降を示していた。

ところで、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となることを示す。一方  $dc_i/dt < 0$  ではこれと逆の関係がある。このため、 $c_i$  の傾きが大きいところで地形の急激な上昇または下降が生じることを表現できる。

例えば、図-5に示す空間関数において、11km地点付近に着目すると、実測値に対する第1主成分は負値であるのに対し、計算値に対する第1主成分は正値となっている。これにより、この地点の河床変動の傾向は以下のように侵食傾向と判断される。

		$\langle dc/dt \rangle$	$\langle e \rangle$		
実測値	$\langle + \rangle$	*	$\langle - \rangle$	$\langle - \rangle$	侵食
計算値(case01)	$\langle - \rangle$	*	$\langle + \rangle$	$\langle - \rangle$	侵食

空間関数の第1主成分についてみると、全区間

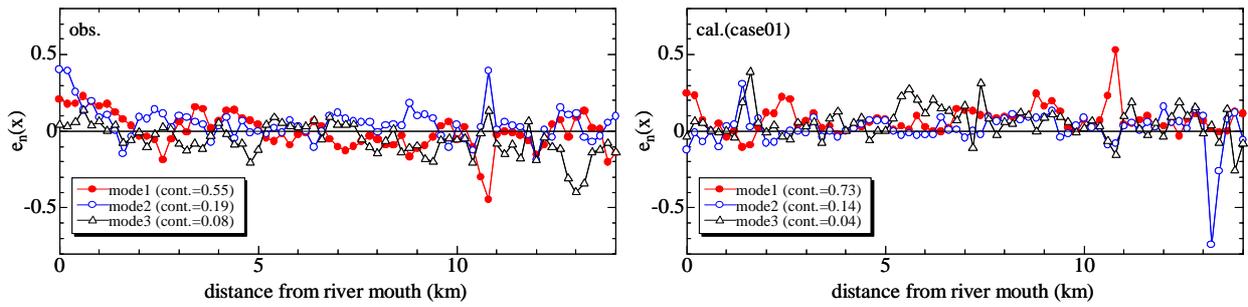


図-5 空間関数の比較（実測値，計算値（case01））

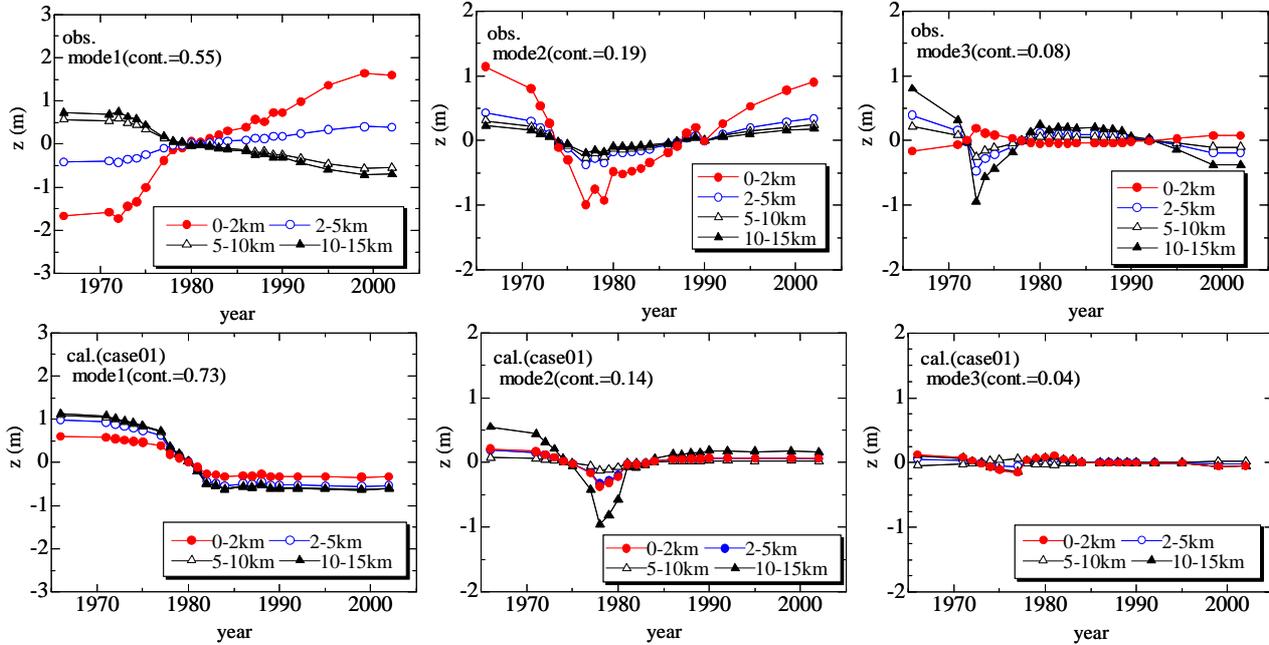


図-6 各主成分による平均最深河床位の変動（実測値，計算値（case01））

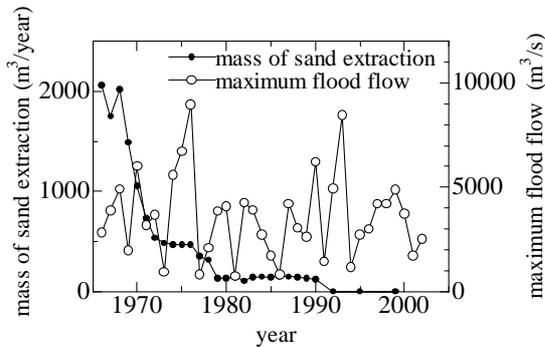


図-7 砂利採取量と最大洪水日流量の経時変化

(0-14km) の多くの地点で実測値と計算値の空間関数の符号が逆転している．このため，時間関数の傾きが実測値と計算値で反対であっても，河床変動の傾向としてはよく似た傾向を示す．したがって，時間関数，空間関数のそれぞれを比較して議論することも重要であるが，時間関数と空間関数の組み合わせで河床変動の傾向を評価する必要がある．数値計算では河口部の土砂堆積状況や局所洗掘の再現が低かったため，時間関数，空間関数が実測値のもの

違う結果をもたらしたものと考えられる．

図-6は，式(9)を用いて各主成分に起因する河床変動量を抽出したものである．寄与率の大きい第1主成分による河床変動量についてみると，実測値に対する解析結果では，河口5kmまでの区間とそれより上流区間で河床変動の傾向が異なることがわかる．1980年を境に，それ以前は河口5kmより上流側で堆積，下流側で侵食傾向にあったのが，1980年前後を境に上流側で侵食，下流側で堆積傾向に転じている．特に河口0-2km区間の最深河床部における堆積速度は0.1m/年程度となっている．河口0-2km区間で見られる河床上昇の傾向は海側から土砂供給を反映したものと考えられる．また，吉野川上流では，1973年に早明浦ダム，1975年に池田ダムが竣工しており，これらのダム建設による土砂供給能の低下が，1980年以降に河口5kmより上流側でみられる侵食傾向の一因になっているとも考えられるが，これについては，解析対象区間をダム直下まで広げてより詳細に検討する必要がある．

一方，数値計算に対する解析結果では，1985年まで0-14km全域でゆるやかな侵食傾向にあり，それ以

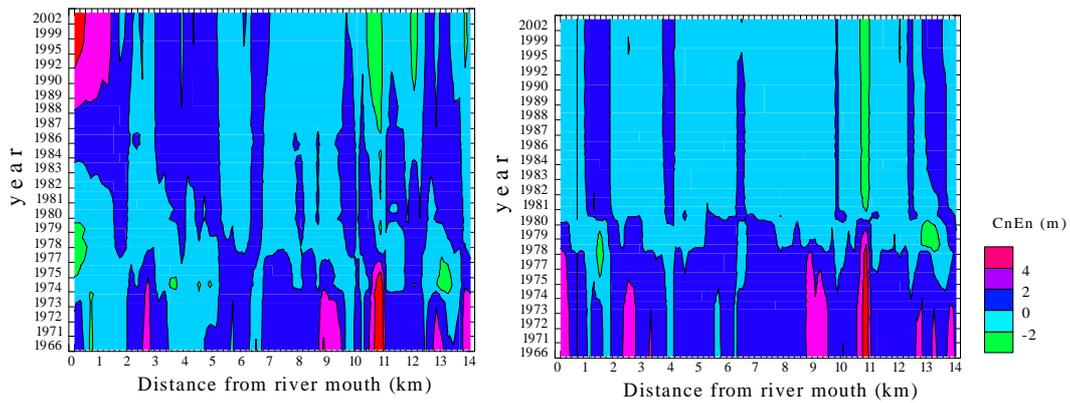


図-8 各主成分による平均最深河床位の変動（実測値，計算値（case01））

降は変動がほとんど見られなかった．特に0-2km区間では実測値の変動量と大きく異なっていた．この理由としては，計算では岸沖方向からの土砂供給を反映できなかったことが考えられる．

次に，第2主成分による河床変動についてみると，実測値，計算値とも似た傾向を示しており，1980年頃までは河床が低下し，1980年を境に河床はゆるやかな上昇傾向（堆積速度：0.2m/年程度）にあることがわかる．この傾向は，図-7に示す砂利採取量の経年変化とよく似ており，砂利採取が活発に行われた1975年頃までは河床は侵食されるが，砂利採取事業が急速に衰退する1980年代以降，河床は平衡状態に向かっている．経験的固有関数法で得られるモード関数の意味付けについては，解析者の主観に頼らざるを得ない部分があり，ここでは単に両者の変化傾向が似ているというだけであるが，他にこのような経年変化を示すインパクトが見当たらないことと，吉野川河口での砂利採取事業の規模から考えても，砂利採取事業の動向が第2主成分による河床変動を説明していると判断した．

第3主成分による河床変動量は，実測値，計算値ともに似たような傾向を示したが，第1，第2主成分に比べてその寄与率は大変小さいものとなっていた．このことから，河口部の河床変動は概ね第1主成分と第2主成分の因子によって説明されることがわかる．したがって，数値解析では，河口における岸沖方向からの土砂移動量を正確に評価することや，計算対象域を超えた流域全体での人為的インパクト（ダム建設や流域産業の変遷）について考慮することが重要である．

### (3) 経験的固有関数法による解析結果を用いた河床変動量の再現性

経験的固有関数法を実施することにより，時間関数  $c_i(t)$  と空間関数  $e_i(x)$  を用いて，河床位変化を再現することができる．図-8は，第3主成分までの時間関数と空間関数を用いて，河床変動量の時空間変化を求めたものである．コンター色が赤いほど堆積傾向，逆に青いほど侵食傾向にあることを示す．実測値と解析値ともによく似た傾向を示しており，河

口における河床変動量の時空間分布を再現することができた．

## 4. 結論

本研究で得られた成果は以下のとおりである．

- (1) 本研究で用いた一次元河床変動計算モデルでは，河口0-2km区間の沖からの土砂供給，局所洗掘の再現に課題を残すが，吉野川河口域の土砂移動形態をある程度説明することができた．
- (2) 経験的固有関数法を測量データ並びに数値計算結果に適用した結果，吉野川の過去30年の地形変動の要因として，砂利採取や上流でのダム建設といった人為的インパクトや岸沖漂砂河床変動に影響を及ぼしている可能性が示唆された．
- (3) 経験的固有関数法で得られたモード3までの時間関数，空間関数を用いて河床変動量を概ね再現することができた．

謝辞：本研究は，文部科学省科学研究費補助金（基盤研究(B)17360236，研究代表者：中野晋）の助成を受けて行われた．また，横断測量等のデータについては国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所からご提供頂いた．ここに記して謝意を表す．

## 参考文献

- 1) 加藤一正，吉松晃：三次元の経験的固有関数法による深浅図解析方法，港湾技術研究所報告，第23巻，第2号，pp.27-47，1984．
- 2) 中野晋，岡部健士：吉野川下流域の長期地形変動，河川技術論文集，Vol.8，pp.207-212，2002．
- 3) 中野 晋，田所 真路，宇野 宏司，藤本 雅彦：日本沿岸の潮位に見られる長周期変動と温暖化の影響，海岸工学論文集，Vol.49，pp.1351-1355，2002．
- 4) 須賀堯三，葛西敏彦：河川における不定流の計算不法 - 陰形式差分法 - ，土木研究所資料，113p.，1980．
- 5) 土木学会水理委員会：水理公式集例題プログラム集[平成13年版]，2002．
- 6) 黒木幹男，岸力，清水康行：河床変動の数値計算法に関する研究，第17回自然災害シンポジウム講演論文集，pp.175-179，1980．

(2006.9.30受付)