

多列砂州を有する大井川の河床変動特性と、 流量時系列の変化が河床変動へ及ぼす影響

CHARACTERISTICS OF RIVER MORPHOLOGY
AND INFLUENCE OF FLOW REGIME TO CHANNEL MOVING IN THE
DOWNSTREAM OF THE OI RIVER WITH MULTIPLE BARS

溝口敦子¹・赤堀良介²

Atsuko MIZOGUCHI and Ryosuke AKAHORI

¹正会員 博(工) 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科
(〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

²正会員 Ph.D 愛知工業大学工学部土木工学科准教授
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草1247)

Physical environment should base on bar morphology which depends on river physical conditions. Complicated river morphology provides variation in hydraulics condition to river eco systems. And it gives some problems to river management.

This paper focuses on both multiple bars and braided channel at the downstream of the Ooi River. Characteristics of transformation on braided channel are important for river management because bank erosion problems often occur with braided channel move. So we tried to get more information about it from aerial photo and field observation. In this year, we got some results related to channel moving as follows. There are the relationships between number of bar mode and that of braided channel. And the rate that area of water surface exists in the area where water surface existed in the past aerial photos is very low. However, this rate recently becomes higher.

Key Words : Multiple bars, braided channels, UAV, field observations, flow regime

1. はじめに

中規模河床形態に関わる研究は、以前から活発に行われてきた。1980年代までに、中規模河床形態の発生領域¹⁾の検討が行われ、なかでも交互砂州に関しては、発達機構²⁾とともに河岸侵食対策の根入れ深さ等の予測のために砂州波高に着目した研究³⁾が数多く実施された。現在は、数値解析で砂州の進行を描写できるようになり、河川環境にも関わるため実河川での砂州の変化等様々な研究が実施されている。一方で、複列砂州、多列砂州に関する研究は、上記発生領域と実河川の中で動きを追う研究^{4)・5)}からはじまり、藤田らにより発達機構等検討がされた^{6)・7)}。これら砂州の研究と平水時の流路の関係性は明確な答えが無く、本研究で着目する多列砂州と網状流路との関係性も未だはっきりしていない。ただし、玉井ら⁸⁾は多列砂州と網状流路の関係について水路実験にて検討しており、それまで給砂過多によって形成されるとされていた網状流路について、多列砂州をベースに

発達しうることを指摘している。しかし、実河川における網状流路は、実験のように一定流量で形成されるような、多列砂州が発達とともに浮き州化し網状流路になっているわけではなく、様々な流量履歴の影響を受けた状態で現れているものである。網状流路を取り扱った研究のうち、実河川における多列砂州の形成と網状流路の関係に着目し、それらの変動特性を詳しく調べた例は見当たらない。本論文で対象とする大井川の下流域では、未だ網状流路が変動しているが、流路変動に伴い発生した河岸侵食に対し護岸を入れるなどの対策が必要になっている。そこで、効率的な河岸侵食対策のあり方を検討するために流路変動特性の解明を目的とした検討を行う。

上記目標に向け、本論文では、まず、大井川の現在の流況やセグメント区分等全体的な河道の物理的特徴から多列砂州の発生可能性を把握する。その後、過去の航空写真やUAVにより取得した写真データ、LPにより取得された詳細地形データなどをもとに、水域の平面的分布と地形の凹凸、つまり多列砂州との関係を明らかにする。

さらに、これまでの水域の変動特性やH24年度の詳細地形を用いて流れの解析を行い、結果を整理することで流量と水域幅および流路本数との関係を明らかにし、各流量が河床変動に及ぼす影響を示した。この結果と2016年度の調査から見えた河床変動状況を踏まえ、最後に、網状流路内で発達する交互砂州が河岸侵食の要因になりうることに着目した検討を行う。具体的には、網状流路のうちの単一流路スケールでの解析を行い、発達・変化の時間スケールを確認する。こうした検討を通じ、本研究では、河岸侵食の原因となる網状流路の変動特性の一部を解明する。

2. 大井川下流域における特徴

(1) 流況

大井川の上流部は、図-1のように豊富な水源のために古くから電源開発が進んでおり、電力ダム群が存在する。さらに、大井川で唯一目的に治水が含まれる長島ダムが2001年に竣工されている。ダムの存在が流量、流砂量の面で下流域に影響を与えていることは想像が容易であるが、治水目的を持つ長島ダム建設にのみ着目すると、図-2や表-1に示すように年最大流量が減少したという変化は現れていない。ただし、ダム建設以降5000m³/sを超える出水は発生していない。これは、長島ダムから国の直轄区間上流端までにある県管理の指定区間が流下能力不足のため、長島ダムが一定率一定量の操作で最大放流量の計画値は5000m³/sとなっているところを暫定的に2250m³/sと下げていることも要因となっている。

また、図-3にあるように日流量を整理すると、以前に比べ、1990年以降日流量で200m³/s以上や100m³/s以上、さらには50m³/s以上が確保される日数が極端に少ない年が増えている。1990年は、大井川の水返せ運動の結果として、下流域への維持放流が確保された年であり、それ以降洪水流量が増加している。ただし、平常時の流量確保の反面、豊水、平水流量は減少している。図-4に示すように降雨量は大きく変化していないため、様々な要因で流況の平滑化が促され、日流量50 m³/s以上が確保される日数が減っていると考えられる。なお、1990年以前の1964年、1984年には渇水があり、その影響としてその年は50 m³/s以上確保される日数は激減している。こうした渇水の年の傾向は木津川でも確認されているが⁹⁾、渇水時はわずかな雨でも利水量確保のためにダムに捕捉され、ダムの下流域では渇水がより深刻になる可能性が高い。

平均年最大流量と日流量の最大値との関係は図-5のようになっており、降雨の状況によって変化するがおおよそ日流量200 m³/s以上はピーク流量が300~400 m³/s程度

表-1 流況の変化

	年最大流量	豊水	平水	低水	渇水	最小
1996-1989	2229.15	78.41	35.93	12.52	2.05	0.91
1990-2014	2623.58	72.19	29.13	13.28	5.97	4.54



図-1 流域図と上流ダム群の様子 (☆: 降雨観測所)

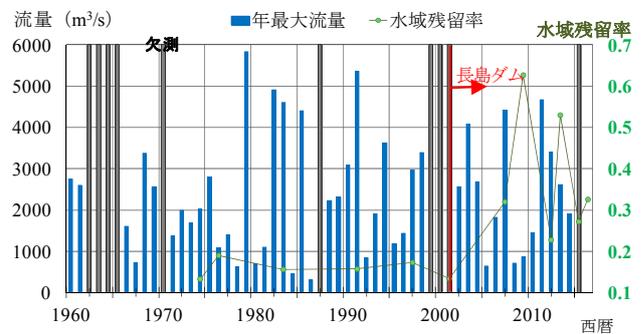


図-2 年最大流量の経年変化と水域残留率 (神座観測所)

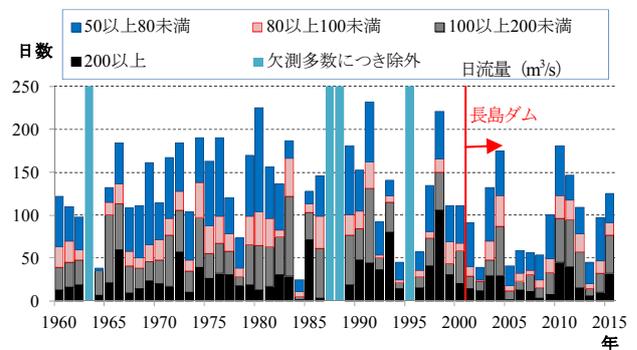


図-3 日流量から算出した各流量の年間日数 (神座観測所)

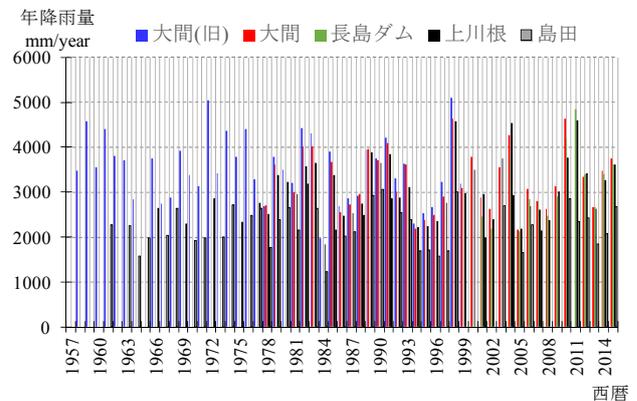


図-4 雨量データ (一部欠測)

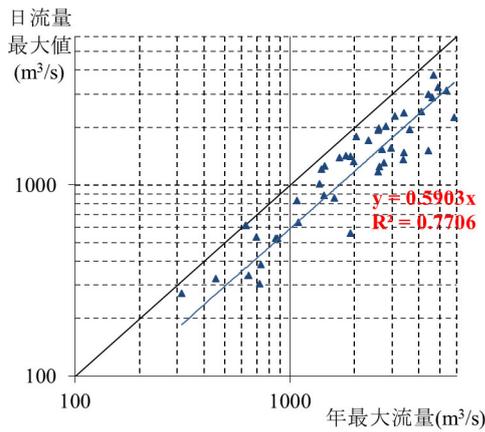


図-5 年最大流量と日流量の関係

表-2 大井川下流域における小セグメント区分

区間番号	1	2	3	4	5
区間 (km)	-0.4~3.8	3.8~10.4	10.4~17.6	17.6~19.4	19.4~24.0
平均勾配	1/298	1/267	1/206	1/339	1/243
平均低水路幅 (m)	850	650	780	440	410
平均粒径 (mm)	26.42	23.46	26.2	24.52	29.42

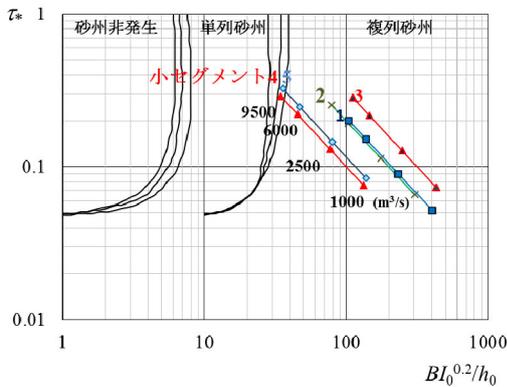


図-6 中規模河床形態の発生領域区分図と小セグメントにおけるプロット (黒木・岸¹⁰⁾ の図を再描写)

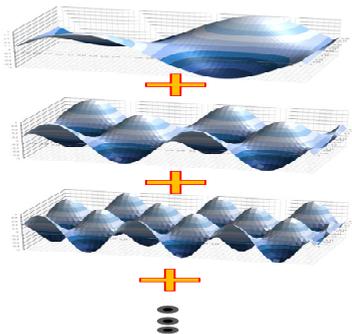


図-7 砂州を構成する波, 式 (1) のイメージ

以上の出水に相当する。過去一年分の大出水, 中小出水回数を, 現在では, 数年以上で経験している状況であり, 1990年以降, 年間で河床変動が起こる頻度は確実に減っていると言える。

(2) 下流域における河道物理条件と砂州の発生領域区分

大井川下流域における平均河床高は2000年(平成12年)の砂利採取禁止以降, 比較的安定しているものの, 牛尾の狭窄部(河口から20km付近)下流付近と河口部

付近の一部区間では堆積傾向である。そのため, 2016年度から流下能力不足解消のため河道掘削の検討が行われている。河床材料粒径については, 下流域全体で平均2~3cm程度で, 粒度分布を確認すると1~10cmの材料がほとんどを占める。これについては経年的にも大きく変化していないが, 最近になって1cm以下の材料が50%程度を占めるような二極化している場所も確認されている。

大井川の下流河道はセグメント1に属し, 1/250程度の河床勾配となっている。縦断方向に多少川幅が変化するため, 細かく分けると, 表-2のように小セグメントに区分できる。各セグメントについて 黒木・岸¹⁰⁾ の領域区分図にて砂州の発生領域を確認すると, 図-6のようになり河床が動く流量時から既往最大流量時には複列砂州の発生領域に入る。さらに, 本研究で対象とする小セグメント2, 3について, 黒木・岸の線形安定解析に従いモード数, 波数を確認すると, 流量によって異なるが, 例えば既往最大の6000 m³/s程度で, 小セグメント2ではモード3~5, 波長700~900m, 小セグメント3ではモード5~7, 波長700~800m程度の多列砂州が発生しやすい条件となっていた。

3. 大井川における河床形態の特徴と変動特性

(1) 詳細地形データを用いた地形の特徴の把握

対象区間の砂州の特徴として, 河床の凹凸の特徴を確認するため, 近年取得されている詳細地形データ(LPデータ)を用いて解析を行う。例えば中規模河床形態は, 図-7のイメージで表現される式(1)で凹凸を表すことができる。これを踏まえ, 式(2)を用いて, 詳細地形を横断方向に80分割, 縦断方向におよそ0.1km間隔で作成したグリッドデータから平均河床高を減じ, 現れる凹凸を解析する。ただし, 波長については連続的に変化させる。

$$z(x_i, y_j) = \sum a_{n,m} \sin\left(\frac{x_i}{L_n} 2\pi\right) \cos\left(\frac{y_j}{B/m} \pi\right) \quad (1)$$

$$a_{n,m} = \left[\sum_i \sum_j z(x_i, y_j) \sin\left(\frac{x_i}{L_n} 2\pi\right) \cos\left(\frac{y_j}{B/m} \pi\right) \right]^2 + \left[\sum_i \sum_j z(x_i, y_j) \cos\left(\frac{x_i}{L_n} 2\pi\right) \cos\left(\frac{y_j}{B/m} \pi\right) \right]^2 + \left[\sum_i \sum_j z(x_i, y_j) \sin\left(\frac{x_i}{L_n} 2\pi\right) \cos\left(\frac{y_j}{B/m} \pi\right) \right]^2 + \left[\sum_i \sum_j z(x_i, y_j) \cos\left(\frac{x_i}{L_n} 2\pi\right) \cos\left(\frac{y_j}{B/m} \pi\right) \right]^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

ここに, z : 河床高, L_n : 波長, m : 砂州モード数, (i, j) : 縦断方向, 横断方向グリッド番号, (x_i, y_j) : (i, j) グリッドにおける座標, B : 川幅, $a_{n,m}$: 波長 L_n , モード数 m (横断方向列数)の河床波の波高となる。

H24年のLPデータを用いて小セグメント2について解

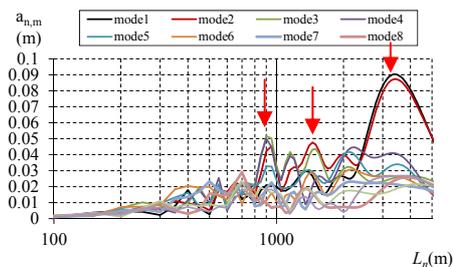


図-8 モードごとの波高データ

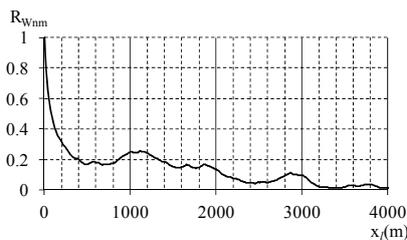


図-9 水域の自己相関

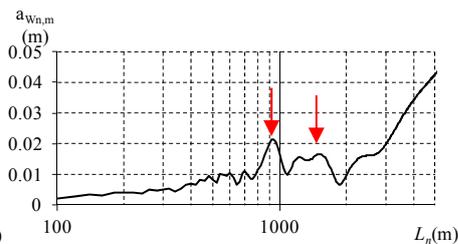


図-10 水域スペクトル解析

析した結果を図-8に示す。これより、様々な波長，モードの河床波で河床の凹凸が構成されているが，波長3.2km程度，モード1，2の河床波が最も卓越しているが，そのほかに，波長1.6km程度，モード2，3および波長0.9km程度，モード2～4の河床波も卓越している。

(2) 航空写真を用いた水域変動特性の確認

大井川下流域の河床変動について調べるための既存データとして，主なものに縦断方向に200mピッチで取得された横断測量河床高データおよび航空写真，レーザープロファイラによる詳細地形データ（LPデータ）がある。ただし，大井川下流域ではLPデータはH19年，H24年，H27年に取得され，それ以前のデータは存在しない。一方，横断測量データは，おおよそ4年ごとに取得されているが，縦断方向に200mピッチのデータであり，多列砂州の地形を把握するには，十分なデータとは言えない。そこで，GIS上で過去の航空写真（n）を整理して水域をメッシュデータ $W_{i,j,n}$ （水域1，陸域0）を作成した。これを用いて水域の平面分布における縦断的なパターンが表れる周期を確認するため，式（3）に示す k 個の縦断メッシュ相当距離 $x_i(k)$ に対する自己相関関数 $R_{Wn}(x_i(k))$ を用いて周期性を確認する。例として小セグメント2の結果を図-9に示し，さらにそこからスペクトル解析をしたものを図-10に示す。併せて，参考として小セグメントの水域の様子を図-11に示す。スペクトル解析の結果から周期の大きなもののほかに，地形と同様の0.9km程度の周期で相関性が高くなっていることがわかる。これは，地形が有する凹凸に関して水域が形成され，平面分布パターンにも現れることを示している。

$$R_{Wn}(x_i(k)) = \frac{\sum_j \sum_i (W_{i,j,n} * W_{i+k,j,n})}{\sum_j \sum_i W_{i,j,n}} \quad (3)$$

(3) 各流量時の流路状況の確認

H24年のLPデータを用いて対象をセグメント2の4～8km付近に限定しiRICソフトのNays2DHを用いて，河床変動を行わず流れの解析のみを実施し，水域情報について整理する。

流れの解析結果から得られる水域のデータから横断方向の流路本数，水域幅等を把握し，領域全体での値を平均値，最大，最小値として図-12，13にまとめる。図-12より，流路本数は，最大で6本，平均的には4本程度と

なっている。これは，2章で論じた初期卓越モード数や3章（2）の結果とよく一致している。水域は撮影時の流量によって変化しうるが，航空写真の水域情報は，地形変動を知る重要な情報となりうる事が分かる。

次に，各断面の水路幅を流路本数で割り，その縦断方向平均値を算出した平均流路幅と流量の関係を描いた図-13および図-12から，次のことが分かる。

- ・流量約400m³/sまでは，一本当たりの流路幅が100～200m程度となる。
- ・流量約200m³/sから流路本数が減少し約2000m³/sで1本となり，流路幅はほぼ全幅となる。

(4) これまでの流路変動

(3) で検討した水域情報を用いて，これまでの流路変

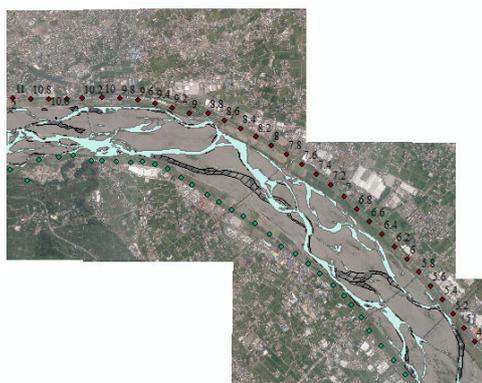


図-11 水域の様子（水色H24，ハッチH25）

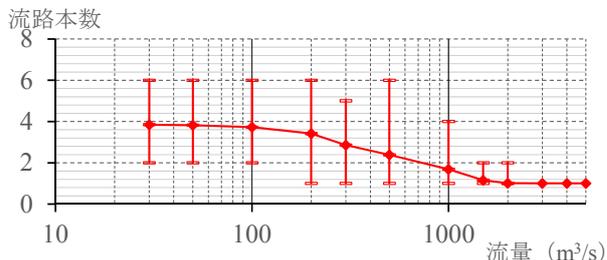


図-12 流量と流路本数の関係

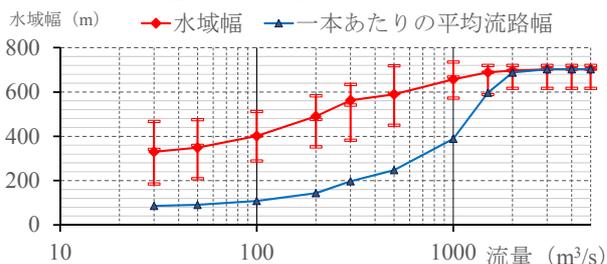


図-13 流量と水域幅，平均流路幅

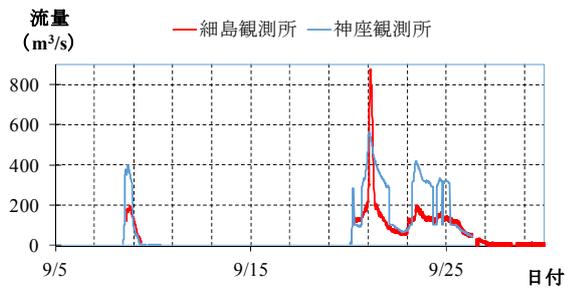


図-14 観測実施日間の流況

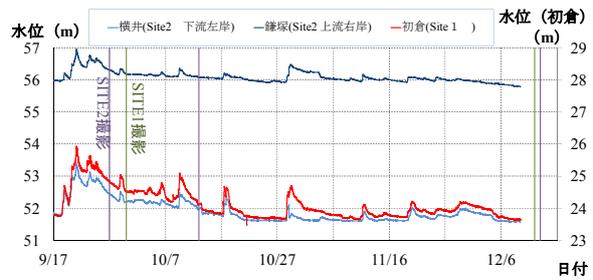


図-15 観測日とサイト周辺水位変化

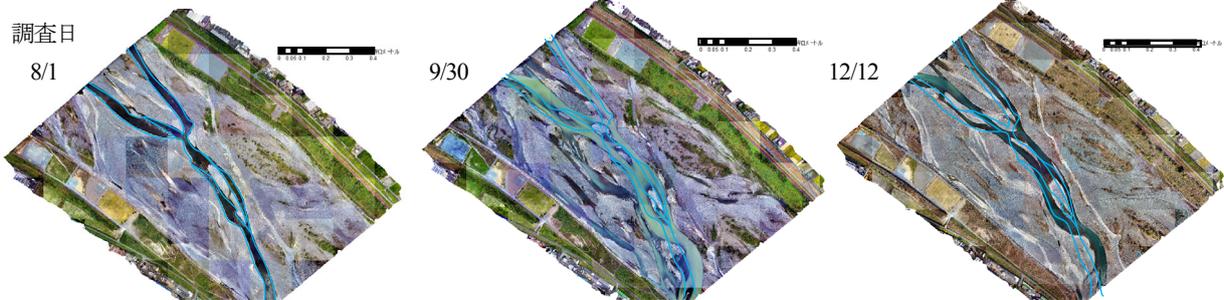


図-16 Site1の変化の様子（水色ライン：8/1時点での水際および砂州前縁線）

動状況を検討した。水域の面的データを用いて前データとの水域の重複率を水域残留率として整理した結果を年最大流量の経年変化の図-2に併せて示している。この結果から以下のことがわかる。

- ・2000年までは、航空写真が撮影される間の出水が $2500\text{m}^3/\text{s}$ 程度でも、残留率は20%以下となり激しく変動していた。近年は低くても30%弱の残留率であり固定化の傾向がある。
- ・航空写真が撮影されるまでの出水が $1000\text{m}^3/\text{s}$ 程度を超えていない場合には、残留率は50%以上となり変動は抑えられる。

(5) $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以下の出水時の流路変動

2016年夏期～秋期にかけて、河床変動特性を調べるため、大井川の下流域小セグメント2, 3でUAVによる写真撮影、河床高の計測を行った。小セグメント2は7km付近 (Site1), 小セグメント3は14km付近 (Site2) で調査を行った。撮影期間の出水による流量と現地水位の上昇傾向を図-14, 15に示す。大井川は変動が激しいため水位計測地点の水面の確保が難しく渇水状態だった2016年は欠測が多いが、図-14は観測所の水位から2015年度のHQ曲線を用いて算出した流量であり、参考値として示している。これらによると、計測期間の最大出水は $800\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、現地では最大で2m程度の水位上昇となっていたことが分かる。また、図-16の例からわかるように、 $800\text{m}^3/\text{s}$ 程度の出水であっても網状流路には変化が現れ、砂州の発達による河岸浸食などが起こっていることが確認できた。

4. 流量規模、時系列変化が河床変動に与える影響の考察

これまでの現地データの整理および現地調査結果を踏まえ、特に流量規模が河床変動に与える影響を考察する。ここでは現象を単純化して把握するため、あえて現地地

形は用いず、下流域の平均的な水路幅、河床材料、河床勾配等の特徴を用いて直線流路上で河床変動解析を実施し、現地における河床変動の傾向を見出す。解析は周期境界条件を用いて行い、著者の一人が名古屋大学にて砂州描写用に開発してきたNH2Dを用いて河床変動解析まで行っている⁸⁾。

大出水時の多列砂州の形成状況を確認するため、小セグメント2の条件で $4000\text{m}^3/\text{s}$, $6000\text{m}^3/\text{s}$ など一定流量通水し数値解析を実施すると高モードの砂州が形成されることが確認された。

一方、現地データを検討した結果から、 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以下になると網状流路となり、水域が複数本の流路となることがわかっている。 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以下の出水時には、3.

(4) で検討した現地観測でみられたように流路内の河床変動が活発に起こり、今回は平水時の流路内に交互砂州が発達していることが確認された。これを意識し、図-17で川幅100m, 200m, 流路勾配1/250で砂州の発生領域を確認すると、複列砂州から単列砂州の領域に入る。流量が大きくなれば交互砂州が発達する条件となる。実際に、幅100m, 勾配1/250, 河床材料2.3cm程度の水路に一定流量で $300\text{m}^3/\text{s}$ を通水した数値解析を行うと、初期には複列砂州が発達し、発達過程で単列砂州へ移行する。次に流況を意識し、0.5時間一定流量通水後図-18のようなハイドログラフを繰り返し与えると、図-19のように砂州波高の発達を示す。ハイドログラフで流量を与えた場合、モード2の複列砂州が徐々に発達し変化する。通水初期は流量が大きいときに波高が発達するが、ある程度発達すると、波高の変化は流量が小さい時間帯に起こることが確認される。ハイドログラフの周期によっても発達に要する時間は異なるが、一定流量で通水されなくても比較的早く砂州が発達しハイドロに応じた変動を示すことが確認された。実際の現地の状況では流量が変化

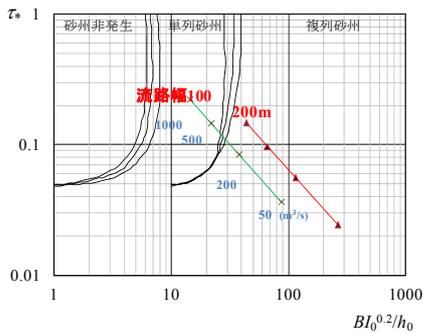


図-17 中規模河床形態の発生領域区分図と流路内の状況のプロット (黒木・岸¹⁰⁾ の図を再描写)

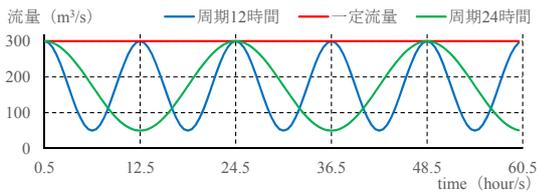


図-18 流量ハイドログラフ



図-19 波高時間変化

するとともに幅も変化するため、この解析がすべてを表すわけではないが、近年の大出水を含めた様々な出水規模の減少は流路内の河床変動を促すし、ダムによって変化したハイドログラフによっては網状流路内の砂州の発達を促す可能性が高い。なお、流量の変化による流路幅の変化、および流路内の地形の発達によって大出水時の多列砂州の変動にどのような影響を与えるかは今後検討する必要がある。

5. 結論

本研究は、網状流路を形成している大井川下流域について、その変動特性を知るために検討を行った。

大井川では、1990年以降の環境維持流量の放流、2001年の唯一目的に治水が含まれる長島ダム竣工などで、流況が大きく変化している。特に年最大流量は平均的には変化していないが、5000m³/sを超えることがなくなり、渇水流量の回復の一方、年間を通じて日流量が50m³/s以上となる日数が減少するなどの変化が抽出された。

また、大井川下流域の詳細地形データと航空写真データの水域平面分布を解析し、大井川の網状流路は多列砂州上に形成されていることを示した。あわせて、流れの解析、変動特性を調べることで、流量と水路幅の関係や

流路本数の変化を明らかにした。これに加え、現地調査にて水域の変動等を調べた結果により、1000m³/s以下のピーク流量の出水でも網状流路内で河床変動が起こり河岸侵食等につながっていたことが確認された。

現地データから得られた知見を確認するため、単純な河床変動解析を実施した。実スケールでの多列砂州の形成確認を行うとともに、平水時の流路スケールでの砂州の発達を解析したところ、発生領域区分と同様な結果が出た。また、流量時系列を考慮して低水流路内の解析を行ったところ、出水が繰り返し起こることで砂州が比較的早く発達し、出水周期によって発達の速度が変化することなどが分かった。

今回、様々な検討を行ったが定性的な理解につなげるためのパーツであり、流況の変化の抽出結果が現在の大井川の状況につなげるまでの説明にいたっていない。大出水時の多列砂州の変化と平水時の網状流路内の変動がどのように結びつくか、流量によって川幅が変化することが網状流路内の砂州の発達にどう関係するかなど実現象の解明に向け、さらに検討していく必要がある。

謝辞：本研究は、河川砂防技術研究開発公募 地域課題分野（河川）の「“多列砂州河道の特徴を踏まえた河道維持管理”に向けた検討」（代表者：溝口敦子）の一部として行われた。実施にあたり、中部地方整備局静岡河川事務所および島田出張所の多大なるご支援と、名城大学理工学部溝口研究室の2016年度4年次学生に協力いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp. 87-96，1984。
- 2) 例えば、藤田裕一郎，村本嘉雄，堀池周二：交互砂州の発達過程に関する研究，京大防災研究所年報第24号B-2，pp. 1-21，1981。
- 3) 例えば、池田駿介：単列交互砂州の波長と波高，第27回水理講演会論文集，pp. 689-695，1983。
- 4) 木下良作：洪水の流路形態の現地観測，第14回水工学に関する夏期研修会講義集，pp. A-7-1-A-7-117，1978。
- 5) 砂田憲吾：釜無川(富士川)における中規模河床変動特性，土木学会論文集，No.363，II-4，pp. 235-243，1985。
- 6) 藤田裕一郎，赤松英樹，村本嘉雄：網状流路の形成過程，第31回水理講演会論文集，pp. 695-700，1987。
- 7) 藤田裕一郎，永田順宏，村本嘉雄：多列砂州の形成・変化過程と細砂河床の影響，水工学論文集，第36巻，pp. 23-28，土木学会，1992。
- 8) 玉井信行，長尾哲，三国史雄：直線水路における複列砂礫堆と網状流路の形成について，第22回水理講演会論文集，pp. 265-273，1978。
- 9) 寺本敦子，宮脇真二郎，辻本哲郎：木津川下流域における砂州地形の特徴と植生域の変遷シナリオ，河川技術論文集，第10巻，pp.375-380，2004。
- 10) 寺本敦子，辻本哲郎：砂州の形成過程に関する数値計算手法，応用力学論文集，第7巻，pp.975-982，土木学会，2003。

(2017.4.3受付)