

幅広水路における非定常流下での砂州形成実験

EXPERIMENTAL STUDY ON BAR FORMATION UNDER UNSTEADY FLOW CONDITIONS USING A WIDE WIDTH CHANNEL

桑村貴志¹・渡邊康玄²
Takashi KUWAMURA and Yasuharu WATANABE

¹正会員 独立行政法人 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 独立行政法人 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

In rivers that have sections of single-row bar and sections of double-row bar, the occurrence mechanisms of bank erosion, sediment accumulation, and other phenomena differ between these two types of section. To determine which of these sections, non-linear analysis of conditions over the border between the regions is needed.

In this study, hydraulic experiments were conducted using a wide width channel in order to understand the bar formation process under unsteady flow conditions. Hydrograph of the experiments were set as the alternate bars and double-row bars were generated. The results of experiments were compared with linear stability analysis under unsteady flow conditions. It was found that alternate bars and double-row bars were generated under the influence of flow conditions process.

Key Words : Alternate bars, double-row bars, unsteady flow, bar formation, stability analysis

1. はじめに

砂州の形態や発達についての研究の多くは、流れの変化速度に比較して砂州の形成時間が極めて長いとの理由から、流れを定常流とみなして行われてきた。しかし、近年増加している集中豪雨による洪水は時間的な水位の変化が大きく、洪水時の砂州の挙動を把握しようとする場合、流れを定常流としてあつかえるかどうか不明である。そのため、著者ら¹⁾²⁾は非砂州領域から単列砂州領域に水理量が変化する非定常流の下での砂州の形成過程について実験および線形安定解析を用いて検討を行ってきた。その結果、非定常流の下での砂州の発達過程は定常流の下でのそれとは大きく異なることを示した。本論文では、河川上流域に見られる複列砂州領域から単列砂州領域に水理量が変化する非定常流下での砂州形成過程に着目した検討を行った結果を報告する。

2. 砂州形成実験

実験は、非定常流の下での砂州の形成がどのように変

化するかを把握する目的で、単列砂州領域と複列砂州領域に水理条件がまたがる洪水波形を用い砂州形成実験を行った。非定常流条件における砂州の挙動と比較するため、定常流条件下における砂州形成実験もあわせて実施した。今回実験に用いた水路は、長さ50m、幅(2 $\bar{B}$)0.9mの直線水路であり、ケース毎に粒径($\bar{d}_s$)0.76mmの均一な珪砂を勾配(I_b)が1/80になるように敷均して初期河床とした。水路の上下流端には初期河床高と同じ高さとした固定堰を設けている。実験中に下流端の固定堰を落下する掃流砂を計量し、同量の砂を上流端から給砂した。

(1) 定常流実験

非定常流の実験に先立ち、砂州の形成状況を確認することを目的として定常流による砂州形成実験を実施した。

実験時の水位は、複列砂州と単列砂州が形成される条件を考慮し、平均水深($\bar{D}_0$)が0.6cmから1.8cmになるように5ケース(S-10~S-50)を設定した。各実験ケースの水理諸元、および砂州の形成が安定に達したと思われる時点での平均砂州波高($\bar{Z}_b$)、砂州波長($\bar{L}_b$)および通水時間($\bar{t}$)を測定し結果を表-1にまとめて記した。ここで、 I_w :水面勾配、 C_f :河床摩擦係数(= $\bar{U}_*'^2/\bar{U}^2$)、 $\bar{U}_*'$:

表-1 定常流実験の諸元

ケース名	$\tilde{Q}$ cm ³ /s	$\tilde{D}_0$ cm	$\tilde{T}$ min.	I_w	I_b	C_f	β	$1/d_s$	ϑ	中規模 河床形態	$\tilde{L}_b$ m	$\tilde{Z}_b$ cm	λ	Z_b
S-10	1660	0.60	960	1/80	1/83	0.0078	149.3	0.13	0.060	複→単	6.02	2.2	0.47	3.67
S-20	3250	0.90	840	1/82	1/81	0.0066	99.6	0.08	0.088	複→単	6.11	3.7	0.46	4.11
S-30	5270	1.20	600	1/85	1/76	0.0058	74.7	0.06	0.113	複→単	6.08	4.2	0.46	3.50
S-40	7600	1.50	330	1/83	1/83	0.0055	59.7	0.05	0.144	単	6.32	4.2	0.45	2.80
S-50	10350	1.80	240	1/79	1/82	0.0054	49.8	0.04	0.181	単	6.56	5.1	0.43	2.83

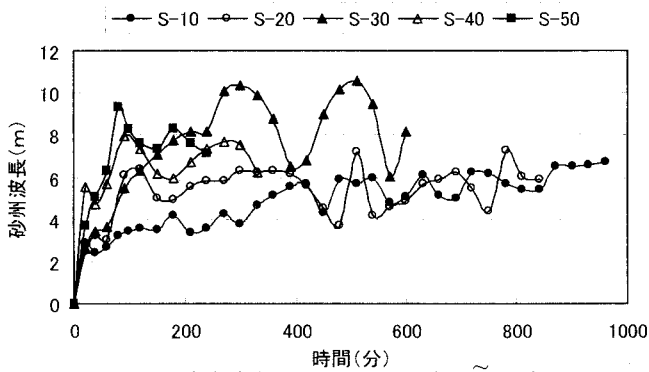


図-1 定常流実験における砂州波長 $\tilde{L}_b$ の変化

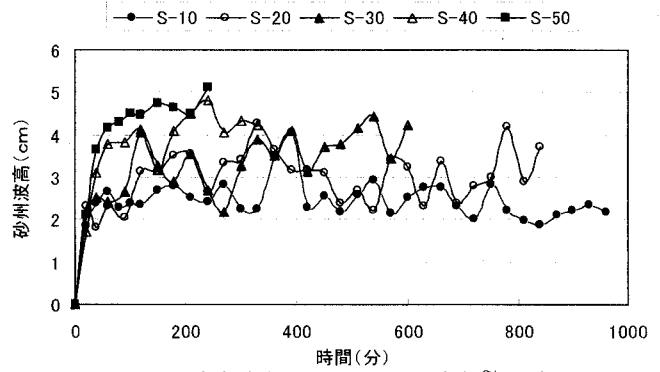


図-2 定常流実験における砂州波高 $\tilde{Z}_b$ の変化

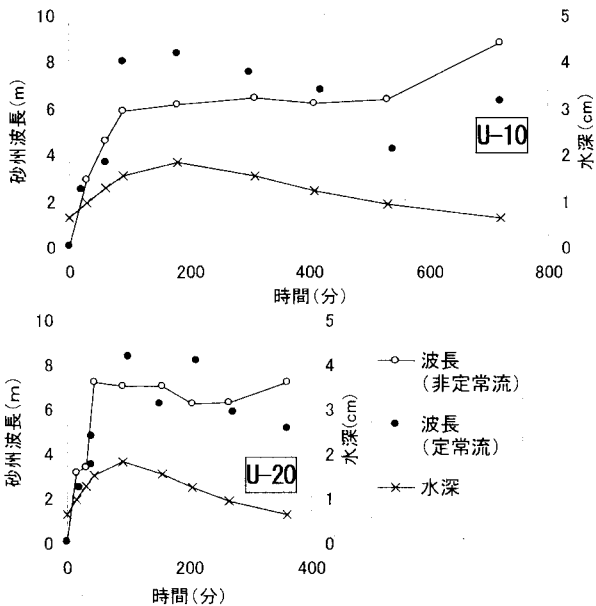


図-3 定常流, 非定常流実験の砂州波長 $\tilde{L}_b$ の比較

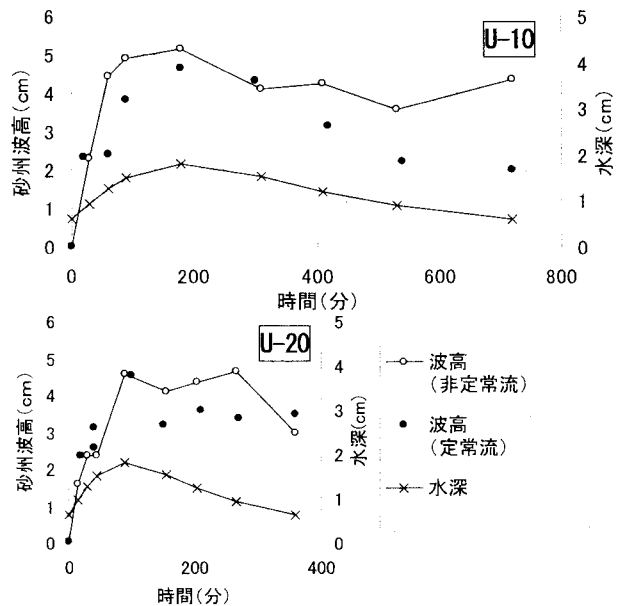


図-4 定常流, 非定常流実験の砂州波高 $\tilde{Z}_b$ の比較

摩擦速度, $\tilde{U}$:流速, β :川幅水深比($=2\tilde{B}/\tilde{D}_0$), d_s :無次元粒径($=\tilde{d}_s/\tilde{D}_0$), ϑ :無次元掃流力, λ :砂州波数($=2\pi\tilde{B}/\tilde{L}_b$), I_b :河床勾配, Z_b :無次元砂州波高($=\tilde{Z}_b/\tilde{D}_0$)である。

図-1, 2に各定常流実験の砂州波長と波高の時間的变化を示した。波長の通水開始後50~100分までの成長速度は、その後の速度に比較して大きい。水深が大きいほど波長が成長するが、砂州の消長を繰り返すため波長の変動も大きい。水深が小さいS-10, 20, 30のケースでは通水開始直後に複列砂州が形成されたが、それぞれ約300分, 80分, 50分経過後に全て単列砂州に移行した。最も水深の小さいS-10では平衡状態に至るまで960分を要しており、水深が低いほど砂州波長の成長速度が小さい傾向となっている。波高も水深に比例して大きくなるが、

どのケースも通水後100分程度で成長が止まり、それ以降は砂州の消長により変動を繰り返した。

このように複列砂州領域の水利条件における砂州は水深が砂州による洗掘に比べて小さく浮州化しやすく、竹林³⁾が指摘しているように浮州化により大きく河床変動特性が変化する。

(2) 非定常流実験

非定常流実験は、初期水深($\tilde{D}_p$)および洪水終了時の水深が複列砂州領域となり、最大水深($\tilde{D}_p$)で単列砂州領域となる水位波形を用い、2つのケース(U-10, U-20)について実施した。U-10とU-20は、洪水継続時間の異なり、洪水継続時間($1/\tilde{\sigma}$)で無次元化した経過時間(τ)は、式(1)で表される同一のハイドログラフとなる。

表-2 非定常流実験の諸元

ケース名	$\tilde{Q}$ cm ³ /s	$\tilde{D}_0$ cm	$\tilde{T}$ min.	I_w	I_b	C_f	β	$1/d_s$	θ	中規模 河床形態	$\tilde{L}_b$ m	$\tilde{Z}_b$ cm	λ	Z_b
U-10-1	3440	0.93	30	1/79	1/86	0.0068	96.2	0.08	0.094	複列	2.85	2.3	0.99	2.47
U-10-2	5570	1.24	60	1/79	1/88	0.0062	72.1	0.06	0.126	複列	4.50	4.4	0.62	3.57
U-10-3	7600	1.50	90	1/78	1/80	0.0059	59.8	0.05	0.153	単列	5.83	4.8	0.48	3.25
U-10-4	10320	1.80	180	1/79	1/82	0.0055	49.8	0.04	0.182	単列	6.09	5.1	0.46	2.86
U-10-5	7730	1.51	310	1/77	1/88	0.0059	59.2	0.05	0.157	単列	6.42	4.1	0.44	2.72
U-10-6	5270	1.20	410	1/79	1/77	0.0063	74.5	0.06	0.122	単列	6.18	4.2	0.46	3.54
U-10-7	3280	0.90	530	1/81	1/81	0.0067	99.1	0.08	0.090	単列	6.35	3.5	0.44	3.98
U-10-8	1650	0.60	720	1/82	1/81	0.0075	149.3	0.13	0.058	単列	8.80	4.3	0.32	7.27
U-20-1	3430	0.93	15	1/81	1/81	0.0066	96.2	0.08	0.092	複列	3.10	1.5	0.91	1.70
U-20-2	5570	1.24	30	1/79	1/82	0.0062	72.1	0.06	0.125	複列	3.30	2.3	0.85	1.89
U-20-3	7600	1.50	45	1/81	1/83	0.0057	59.8	0.05	0.148	単列	7.13	2.3	0.39	1.55
U-20-4	10320	1.80	90	1/82	1/90	0.0053	49.8	0.04	0.175	単列	7.00	4.5	0.40	2.52
U-20-5	7730	1.51	155	1/80	1/79	0.0057	59.2	0.05	0.152	単列	6.96	4.0	0.40	2.69
U-20-6	5270	1.20	205	1/79	1/90	0.0062	74.5	0.06	0.121	単列	6.18	4.3	0.45	3.60
U-20-7	3280	0.90	265	1/79	1/83	0.0068	99.1	0.08	0.091	単列	6.22	4.6	0.45	5.12
U-20-8	1650	0.60	360	1/80	1/80	0.0078	149.3	0.13	0.060	単列	7.13	2.9	0.39	4.90

$$D_0 = \left[\frac{\delta_f (\tau + \alpha_f)^2}{\tau^2 + \beta_f} - \gamma_f \right]^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

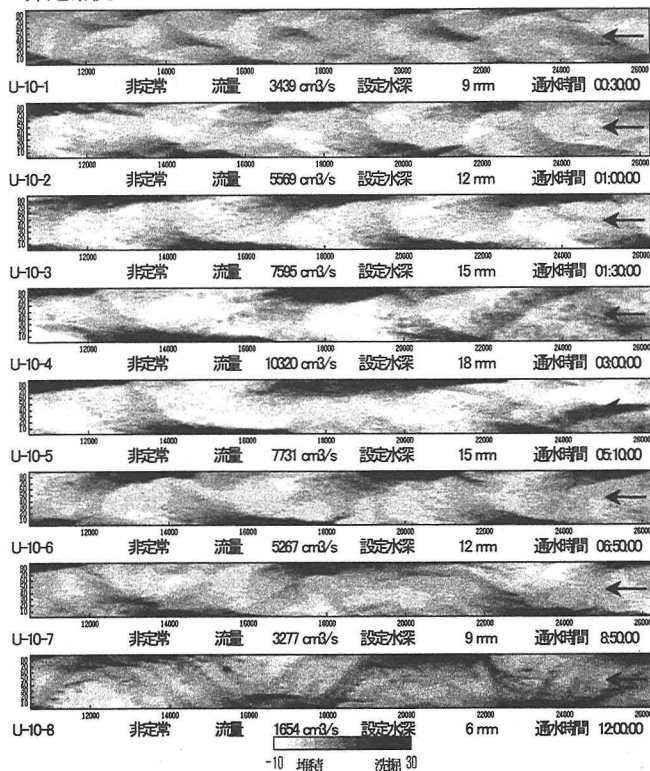
ここで、 $D_0 = \tilde{D}_0 / \tilde{D}_B$ である。また、洪水開始時および終了時に限界掃流力となり、水位ピークが $\tau = 0.2$ において初期水深の3倍程度となるように、 $\alpha_f = 0.500$ 、 $\beta_f = 0.125$ 、 $\gamma_f = 1.16$ 、 $\delta_f = 1.08$ とした。実験洪水時間はケースU-10が720min、ケースU-20はその1/2の360minである。実際の礫床河川における洪水継続時間や砂州形成速度と比すとU-10は長い時間であるが、平衡状態に至るまで行った定常流実験との比較を行うためにそれらの洪水継続時間とした。また、非定常流における砂州の変化を把握するため、洪水期間中に8回の河床測定を行うこととした。なお、測定を行ったときの水深は定常流実験で用いた水深と同一とした。河床測定は通水を停止して行ったが、非定常流れの継続的な砂州の変化を捉えることを目的としていることから、各実験とも通水停止の都度河床を形成しなおして最初から所定の時間まで連続して通水することとした。水位および河床高の測定は、レーザー式測距器を用い、水路中央部である上流端からの縦断距離が10.00mから26.25mの16.25mの区間でを行った。測点間隔は、横断方向に5mm、縦断方向に15cmとした。各実験ケースの水理諸元および通水停止時の砂州の諸元を表-2にまとめて記した。図-3に各ケース8回の河床測定で得られた非定常流時の砂州波長の時間変化を示した。また、それらの各測定時水位と同水位での定常流実験結果のなかから、非定常流実験での河床測定時刻と同じ経過時間のときの波長を併せて示している。U-10の波長は通水開始から増加するが、複列砂州から交互砂州に移行する水深1.5cmに達した以降は波長約6.0mで推移し、水深が0.6cmに低下した際に波長が増加している。波長が増加した理由は図-6のベクトル図中のU-10-8に示

されるように、形成されている砂州の前縁部に沿う溝筋以外の箇所が浮州化し、溝筋を川幅とする蛇行流路のような状態となったためである。U-10での定常流と非定常流での波長を比較すると、100~180分の時間帯で非定常流下の波長が定常流下の波長に比べて2mほど短い。これは、非定常流実験において水位ピークに至るまでの水深が定常流実験に比較して小さいためである。そのため、成長速度が最も大きい通水初期の時間帯で砂州の成長に大きな影響を及ぼしている。また、400分以降では非定常流では水位が順次低下しているが波長は減少せず、定常流での波長よりも大きく、明らかにそれまでの波長と水深の履歴効果を受けている。U-20では、波長は通水開始から増加し複列から交互砂州に移行する水深1.5cm頃に最高となり、U-10より1m以上長い7.13mとなった。しばらく波長を保った後、6m程度まで波長は減少した。最後に波長が増加しているのはU-10のケースと同じ理由によるが、U-10よりも発達時間が短いため増加量は少ない。

図-4に砂州波高の時間変化を記した。また、図-3の波長と同様に定常流実験の砂州波高についても記した。U-10の波高は水位ピーク付近で波高が最大の5.1mmとなり、その後緩やかに減少し最後に再び増加するといった波長と同じ傾向がみられた。U-20の波高は水位ピーク時に波高がほぼ最大となり、しばらく波高を保った後に減少した。U-10とU-20の実験結果を比較すると、洪水継続時間の長いU-10の方が波長・波高の変化が緩やかで水位との相関があり、波高も定常流実験結果と近い値であった。

図-5のコンター図に示すように、ケースU-10、U-20とも、通水初期の水深9mm、12mmのときには複列砂州が発生したが、水深15mmに達すると単列砂州に移行した。しかし、水位ピークを経て、再び水深が12mm以下に低下しても複列砂州には戻らず、水深に対するヒステリシスを有していることが確認された。図-6にU-10における表面

非定常流 U-10



非定常流 U-20

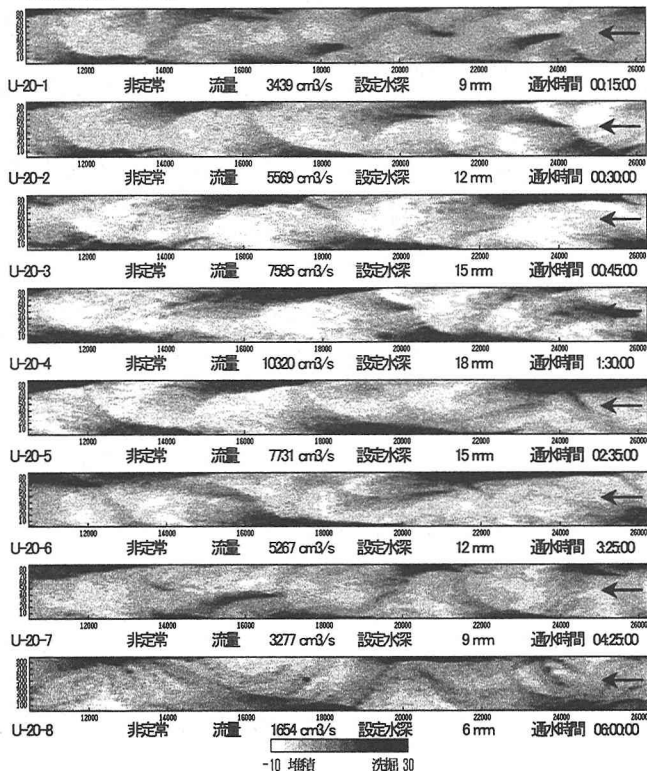


図-5 非定常流実験のコンター図(U-10-1～8, U-20-1～8)

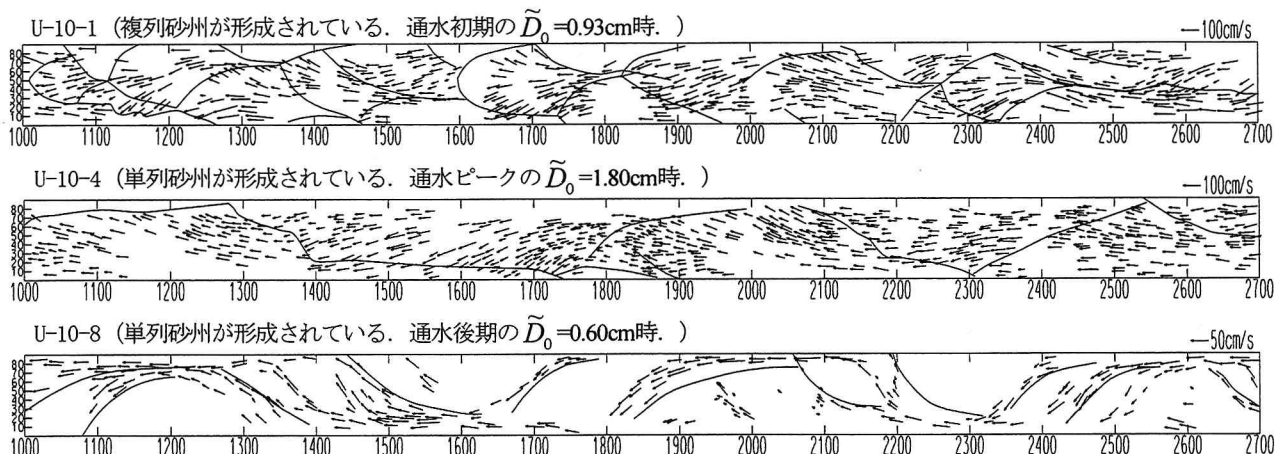


図-6 表面流のベクトル図(U-10-1, U-10-4, U-10-8)

流のベクトル図を示した。U-10-1, U-10-4では、砂州前縁を横切るように流下しており、そのベクトル向からも複列砂州と単列砂州の流れの違いが顕著に表れている。

3. 非定常流における線形安定解析による検討

(1) 線形安定解析の概要

渡邊ら^{1), 2)}による非定常流における砂州の安定解析の複列砂州から単列砂州へ移行する条件における適合性を確認するため、今回の実験結果と解析結果の比較を行った。以下に渡邊らの安定解析の概要を述べる。

非定常流における水深の摂動量 $\hat{D}_1$ は(2)式で表される。

$$\hat{D}_1 = \zeta \exp \left[- \int_{t_0}^t G dt' \right] \quad (2)$$

ここで t_0 : 通水開始時刻, ζ : 積分定数, G : 各時間の摂動量の増幅率であり, $G(\bar{d}_{s,0}, \bar{B}_0, \bar{g}_0, D_0, \lambda)$ である。

(2) 式の指数部は、摂動量が時間的にどのように変化していくかを表すものであり、砂州の時間に関する摂動量の増幅率 Ω である。定常流の場合の増幅率を Ω_s とすると、(3)式で表される。

$$\Omega_s = -G \quad (3)$$

一方、定常流における増幅率と意味は若干異なるが、非定常流の増幅率を Ω_u として、(4)式で表す。

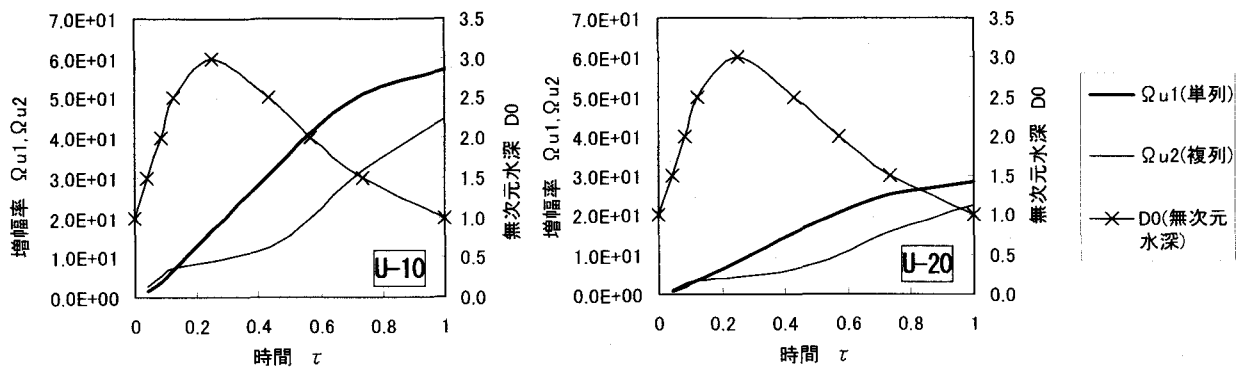


図-7 非定常流での増幅率の時間変化

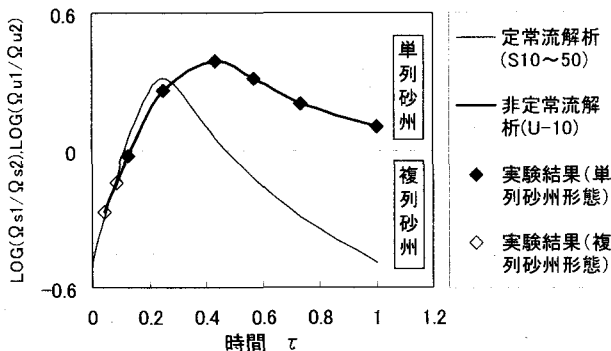


図-8 単列砂州・複列砂州の増幅率比

$$\Omega_u = - \int_0^t G dt' \quad (4)$$

増幅率が正の値のとき砂州は発達し、負の値の時は減衰する。増幅率の最大値を示すが、その時刻において最も発達する波数となる。非定常流とした解析では、あらゆる値の λ がそれぞれの増幅率をもって各時刻において存在し、最も増幅率の大きな λ を卓越波数として時間的に変化しているものと想定している。

今回の解析では、摩擦係数 C_f 、掃流砂量 ϕ の具体的な関数形として、それぞれ Engelund ら⁴⁾による摩擦係数、および初期河床勾配が 1/80 であることを考慮し Meyer Peter – Müller⁵⁾の流砂関数を用いることとした。また、砂州の無次元波高 Z_{bhc} は(5)式で求められる。

$$\begin{aligned} Z_{bhc} &= \varepsilon (F_B^2 f_H - 1) \hat{D}_1 \\ &= \varepsilon \zeta (F_B^2 f_H - 1) \exp \left[- \int_0^t G(t') dt' \right] \quad (5) \\ &= \varepsilon \zeta Z_b \end{aligned}$$

ここで、 ε ：摂動パラメータ、 F_B ：基底流におけるフルード数、 f_H ：水深の摂動量から波高の摂動量を求めるため基礎式から導かれる関数、である。¹⁾

(2) 線形安定解析結果

図-7は、流れを非定常流として扱った場合の砂州増幅率すなわち、 Ω_u の時間変化について、単列砂州 Ω_{u1} と複列砂州 Ω_{u2} の違いを示したものである。ここで Ω_u は、あらゆる値の λ の中で各時刻において最も大きくなる増

幅率を示している。また、 D_0 の時間変化も併記した。

U-10の解析結果では $\tau=0.125$ 付近までは Ω_{u2} が Ω_{u1} に比べ大きくなっているが、その後は Ω_{u1} が上回る結果となった。 Ω_{u1} が時間の経過に伴ってほぼ一定に増大していくことに対して、 Ω_{u2} は初期に大きな増加率を示すがその後 $\tau=0.43$ まで増加率は小さく、それ以降に再度増加率が大きくなっている。なお、 $\tau=0.125$ と $\tau=0.43$ における水深は $D_0=2.50$ であり、定常流の下での中規模河床形態の領域区分上での単列砂州と複列砂州領域の境界付近と想定していた水理量である。U-20の解析結果でもU-10と同様の傾向を示し、 $\tau=0.125$ 付近までは Ω_{u2} が Ω_{u1} に比べ大きく、その後は Ω_{u1} が上回った。増幅率 Ω_{u1} 、 Ω_{u2} は洪水継続時間の長いU-10における値が継続時間の短いU-20の値より大きくなっている。

図-8は、 Ω_{u1}/Ω_{u2} の比の対数をとった値の時間変化を示したものである。 Ω_{u1}/Ω_{u2} の値が正となり単列砂州の増幅率が複列砂州の増幅率を上回ると単列砂州が発生し、逆に負の値を示すと複列砂州が発生することを意味する。また、比較のため流れを定常とした場合の増幅率の比 Ω_{s1}/Ω_{s2} についても併記している。なお、U-20の Ω_{u1}/Ω_{u2} の値の変化はU-10とほぼ同じであったことから、ここではU-10の結果のみ示した。 Ω_{u1}/Ω_{u2} の線上には、実験で観測された砂州形態を凡例で示す記号を用いて重ねて示した。定常流解析では $\tau=0.00 \sim 0.16$ 付近まで複列砂州となり、その後水位ピークを経て $\tau=0.45$ 付近まで単列砂州となり、水深の低下に伴って再び複列砂州となる。非定常流の場合は、 $\tau=0.00 \sim 0.18$ 付近まで複列砂州であり、その後は単列砂州となり、水位ピークを経て水深が初期の水深にまで低下しても複列砂州には戻らない。また、複列砂州の増幅率に対する単列砂州の増幅率の大きさが最も大きくなる時間は、定常流とした解析の場合は水位ピーク生起時刻であるのに対し、非定常流とした解析の場合にはピーク後の $\tau=0.4$ 付近である。

単列砂州と複列砂州の領域の推定については、非定常流解析結果が砂州形態の実験結果と合致しており、非定常流解析により今回の実験における砂州形態を表し得ることが確認された。

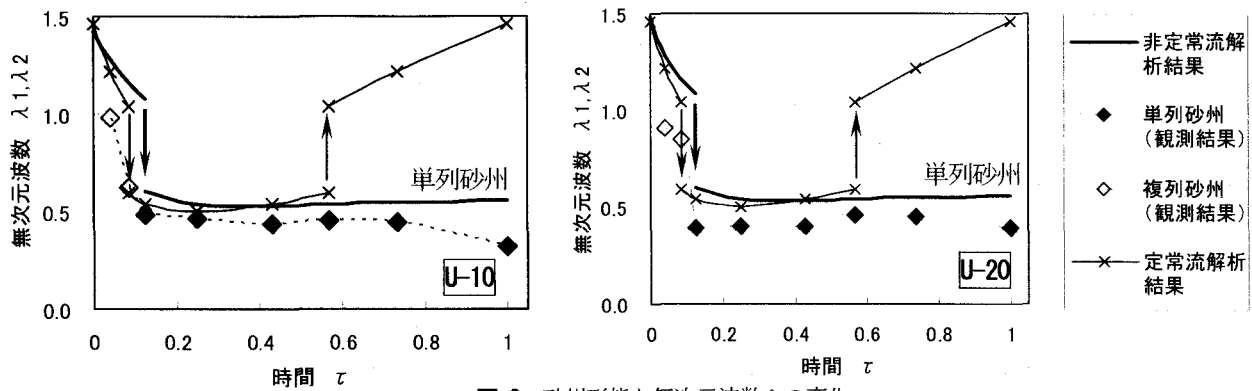


図-9 砂州形態と無次元波数 λ の変化

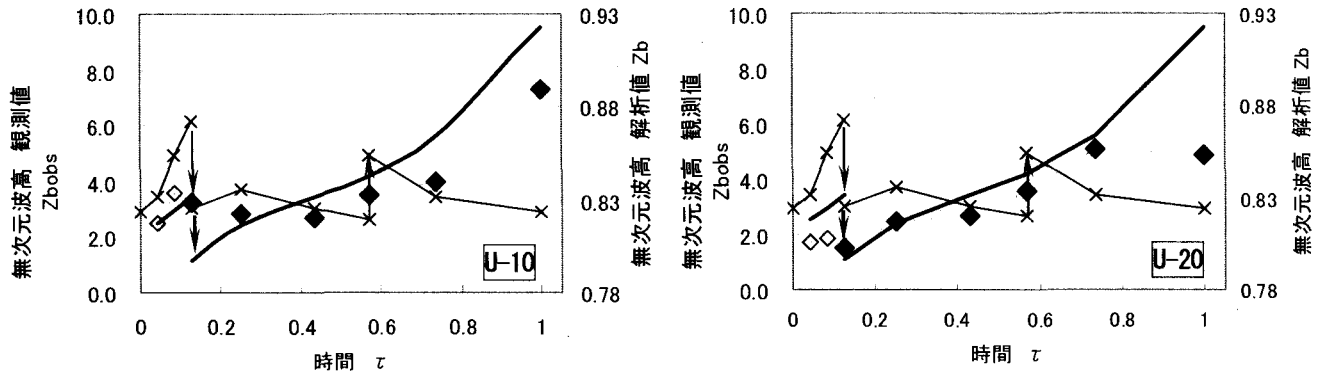


図-10 無次元波高 Z_b の変化

(図中の記号は図-9を参照)

図-9にU-10, U-20における λ の実験結果と解析結果をそれぞれ示した。 λ の解析値は各時間において単列砂州と複列砂州の二つの値が求まるが、図には Ω_{u1}/Ω_{u2} から判断された砂州形態の λ を示した。図中の矢印は砂州形態の移行に伴う変化を示したものである。また、図には非定常流実験で観測された無次元波数と砂州形態を併記している。解析結果では、定常流として扱った場合、単列砂州から複列砂州への移行とそのことに伴う λ の減少を表現し得たものの、 $\tau=0.57$ 以降では複列砂州から単列砂州へ再び移行する結果となり実験結果とは適合しなかった。しかし、非定常流の解析結果では、単列砂州から複列砂州への移行による λ の減少、その後の λ の値など、実験結果との適合性も良好であった。U-10の実験結果のうち、 $\tau=0.73$ 以降波高が減少し解析結果と異なる傾向を示しているが、前述したとおり浮州の発生に起因するものであり、その場合の解析方法については今後の課題である。

図-10にU-10, U-20における波高の実験結果 Z_{bobs} と解析結果 Z_b をそれぞれ示した。解析結果では両ケースとも複列砂州から単列砂州へ移行する際に一度減少するが、その後は時間の経過に伴い波高が増加する結果となり、実験結果での波高の変化傾向を示し得ている。

4. おわりに

単列砂州領域と複列砂州領域にまたがる水理条件下での非定常流砂州形成実験では、平坦の初期河床から複列砂州そして単列砂州へと移行した。複列砂州が発生したのは上昇期のみであり、下降期の同一の水位では複列砂州ではなく単列砂州であった。非定常流条件下での安定解析結果は実験の結果を表現しており、洪水時における砂州の発達過程を考える上で、流れの履歴効果が複列砂州と単列砂州との間の変化においても重要であることが確認された。

参考文献

- 1) 渡邊康玄, M. Tubino, G. Zolezzi : 非定常流における交互砂州の安定解析, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集第2部, pp.172-173, 2001.
- 2) 渡邊康玄, 佐藤耕治, 大山史晃 : 非定常流の下での砂州形成実験, 土木学会水工学論文集第46巻, pp.725-730, 2002.
- 3) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士 : 網状流路の時空間的な変動特性, 土木学会水工学論文集第46巻, pp.737-742, 2002.
- 4) Engelund, F. and Hansen, E.: A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, Copenhagen, Danish Technical Press, 1967.
- 5) Meyer - Peter, E., and Müller, R., : Formulas for Bed-Load Transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm, pp.39-64, 1948.

(2002. 9. 30受付)