

非定常流の下での砂州形成実験

EXPERIMENTAL STUDY ON BAR FORMATION UNDER UNSTEADY FLOW CONDITIONS

渡邊康玄¹・佐藤耕治²・大山史晃³

Yasuharu WATANABE, Koji SATO and Fumiaki Oyama

¹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)

²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)

³正会員 株式会社 北開水工コンサルタント (〒062-0052 札幌市豊平区月寒東2丁目)

In the previous researches on the sand bed stability with finite amplitude and growth of alternate bars, it is assumed that flow changes over time due to the unsteady flow do not affect the generation of alternate bars. Hydraulic experiments on the formation of alternate bars under unsteady flow conditions are conducted in this paper. The wavelength and wave height of alternate bars differ significantly between unsteady and steady flow conditions and between rising and falling stage of the water level due to the flood wave. Unsteadiness is typical of actual formative conditions for alternate bars, especially for gravel bed rivers. Results suggest that finite amplitude effects of the flood-wave on alternate bar formation are not negligible when investigating their behavior under unsteady flow conditions.

Key Words : Alternate bars, unsteady flow, bar formation, movable bed experiment, flood flow

1. はじめに

沖積地河川に形成される交互砂州は流れを蛇行させるとともに局所的な水深規模の洗掘や堆積を生じさせる。交互砂州は、河道が停止限界蛇行角以下の場合流下方向に移動するとともに、水量によって発達や減衰する。河道計画や構造物の配置等を検討する場合には、交互砂州の挙動の把握が必要不可欠なものとなることから、防災の立場から、河川工学の分野で様々な研究が進められている。これらの研究は、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扱えるかどうか不明である。

一方交互砂州は、局所的な洗掘や堆積によって河床に瀬や淵を形成し、河川環境を考える場合一般に良好な環境を創出しているとされている。しかし、近年になってダム等の洪水制御による流況の安定による砂州の固定化あるいは浮州化が進み、河川生態系が変化するという問

題が生じてきている。この対策として、ダム放流等による人為的な洪水を生じさせて河床形状の攪乱を発生させ、河川環境の復元を試みる動きも見られるようになってきている¹⁾。人為的な洪水を発生させるためには、貴重な水資源を使用することとなり、河床攪乱に対して効果的な洪水波形や洪水継続時間を的確に把握することが必要不可欠となる。このようなことから、洪水波を想定した非定常流下の砂州の挙動を把握しなければならなくなっている。Tubino²⁾は、砂州の形成限界領域での非線形解析を実施し、非定常流における砂州の挙動の解明を試みている。また、三輪ら³⁾は、流量変化に伴う砂州の挙動について水路実験を行い、砂州の形成に対する流れの非定常性の重要性を指摘している。これらの研究では非定常流の最大流量が最小流量の2倍程度を想定しており、日本における洪水を考えた場合、その比がさらに大きい検討が必要と考えられる。

本研究は、室内水路において洪水を模した非定常流を発生させ、そのときの交互砂州形成の過程を実験的に再現し、渡邊ら⁴⁾の非定常流における砂州の安定解析結果との比較を行い、定常流における砂州の形成とどのように異なるかを把握しようとしたものである。

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-1	750	1.02	300	1/179	-	0.0093	14.7	13.4	0.045	単列	3.4	3.4	0.28	3.33
S-2	1320	1.49	255	1/180	-	0.0093	10.1	19.6	0.066	単列	3.1	2.1	0.30	1.41
S-3	1990	1.95	225	1/179	-	0.0092	7.7	25.7	0.086	単列	2.0	2.5	0.47	1.28
S-4	2500	2.32	285	1/182	-	0.0098	6.5	30.5	0.103	単列	2.1	2.5	0.45	1.08
S-5	3070	2.66	210	1/182	-	0.0098	5.6	35.0	0.118	無	-	-	-	-
S-6	3470	2.92	210	1/180	-	0.0101	5.1	38.4	0.129	無	-	-	-	-

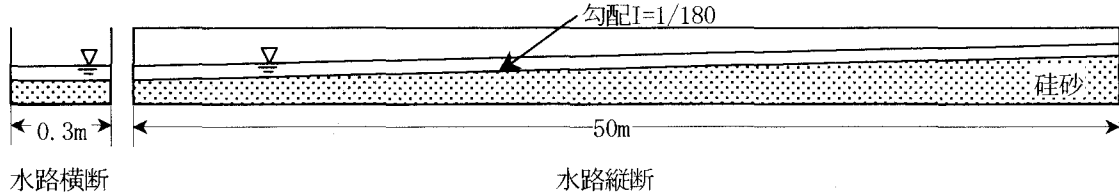


図-1 実験水路模式図

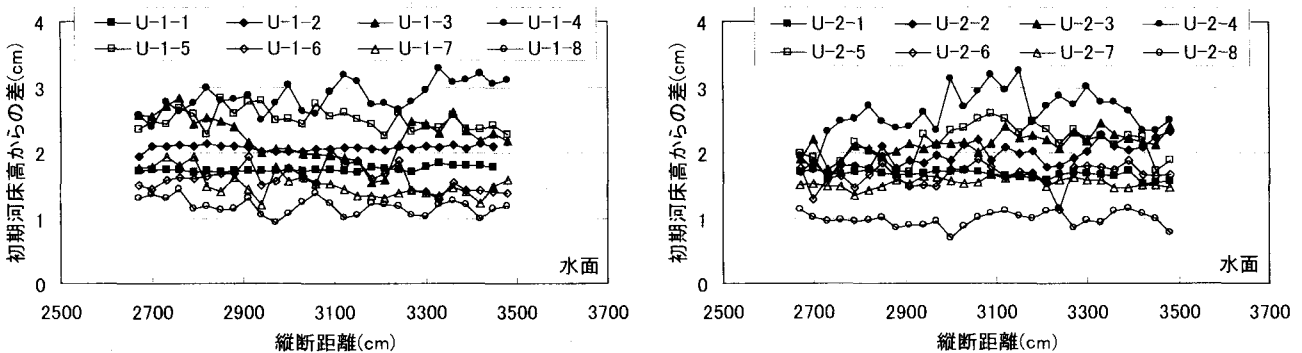


図-2 非定常流実験の横断平均水位の時間変化

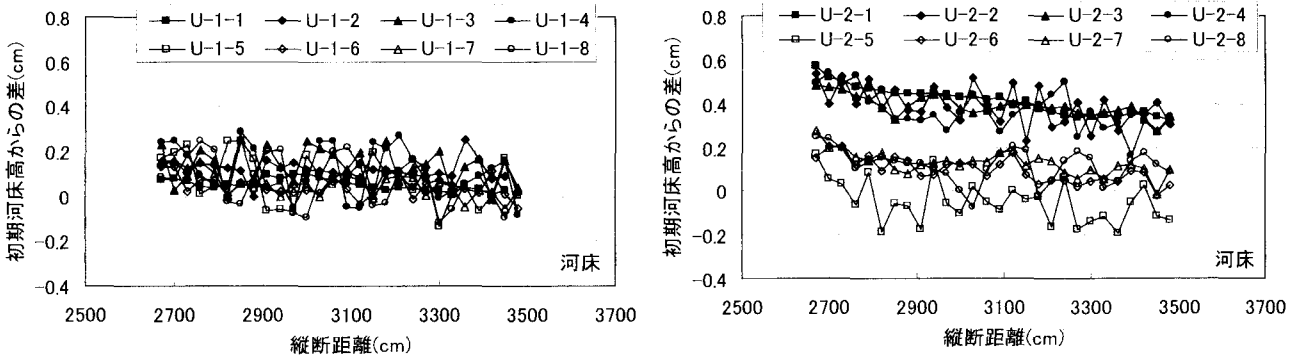


図-3 非定常流実験の横断平均河床高の時間変化

2. 砂州形成実験

実験は、流れが定常流の場合と非定常流の場合で、砂州の形成がどのように変化するかを把握するとともに、洪水時に砂州がどのような挙動を示すかを把握する目的で行われた。実験に用いた水路は、長さ50m、幅($2\tilde{B}$)0.3mの直線水路であり、ケース毎に粒径($\tilde{d}_s$)0.76mmの均一な硅砂を勾配(I)が1/180になるように敷き詰めて初期河床とした。図-1に水路模式図を示す。

(1) 定常流実験

非定常流条件における砂州の挙動の把握に先立ち、よ

り明確な比較のため、定常流条件下における砂州の挙動について把握することとした。流れの条件は、単列砂州が形成される条件としない条件を考慮し、平均水深($\tilde{D}_0$)が概ね1cmから3cmになるように設定した。定常流実験は6ケース(S-1～S-6)を行い、各実験ケースの水力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($\tilde{Z}_b$)、砂州波長($\tilde{L}_b$)および通水時間($\tilde{T}$)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($=\tilde{U}_*^2/\tilde{U}^2$)、 $\tilde{U}_*$ ：摩擦速度、 $\tilde{U}$ ：流速、 β ：川幅水深比($=\tilde{B}/\tilde{D}_0$)、 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($=2\pi\tilde{B}/\tilde{L}_b$)である。なお I_b は河床勾配であるが、定常実験では測定していない。

表一 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	$1/d_s$	g	中規模河床 形態	$\tilde{L}_b$ m	$\tilde{Z}_b$ cm	λ	Z_b
U-1-1	1330	1.60	19	1/185	1/179	0.0130	10.0	22.2	0.073	単列	-	0.8	-	0.47
U-1-2	2030	1.95	38	1/182	1/181	0.0087	7.8	25.7	0.085	単列	1.0	0.9	0.94	0.48
U-1-3	2910	2.10	62	1/168	1/180	0.0057	6.1	27.6	0.100	単列	2.0	1.3	0.47	0.60
U-1-4	3840	2.74	120	1/204	1/177	0.0060	5.2	36.1	0.107	単列	2.0	1.8	0.47	0.64
U-1-5	2890	2.42	206	1/174	1/176	0.0086	6.0	31.8	0.111	単列	2.4	1.7	0.39	0.72
U-1-6	2070	1.56	269	1/175	1/180	0.0045	8.1	20.5	0.071	単列	2.2	1.7	0.43	1.10
U-1-7	1330	1.46	350	1/166	1/177	0.0093	10.9	19.2	0.070	単列	2.0	2.3	0.47	1.58
U-1-8	750	1.11	480	1/176	1/176	0.0122	16.0	14.6	0.050	単列	3.1	3.4	0.30	3.04
U-2-1	1330	1.25	9	1/177	1/174	0.0055	12.0	16.4	0.056	-	-	-	-	-
U-2-2	2030	1.57	19	1/200	1/176	0.0041	9.6	20.7	0.063	-	-	-	-	-
U-2-3	2910	1.75	31	1/198	1/177	0.0028	8.6	23.0	0.070	単列	0.9	0.7	1.00	0.38
U-2-4	3840	2.25	60	1/202	1/175	0.0034	6.7	29.6	0.089	単列	0.8	1.1	1.12	0.49
U-2-5	2890	2.19	103	1/195	1/176	0.0057	6.8	28.8	0.090	単列	1.4	1.7	0.69	0.76
U-2-6	2070	1.56	134	1/187	1/176	0.0042	9.6	20.5	0.067	単列	1.1	1.0	0.90	0.62
U-2-7	1330	1.41	175	1/183	1/177	0.0076	10.6	18.6	0.061	単列	1.6	1.3	0.60	0.94
U-2-8	750	0.86	240	1/183	1/179	0.0060	16.9	11.7	0.039	単列	3.3	2.0	0.29	2.28

実験S-1～S-4は交互砂州が形成されたが、各実験とも通水後200～250分には十分に砂州が発達し、その後砂州波高および砂州波長は時間的に概ね変化していないことを確認した。一方、実験S-5、S-6は砂州が形成されなかった。

(2) 非定常流実験

非定常流の実験は、初期水深($\tilde{D}_0$)および洪水終了時水深が限界掃流力(g_c)となるようにし、最大の水深($\tilde{D}_p$)を定常流実験で砂州の発生しなかった水深である3cm程度とすることとした。非定常流実験に用いた水位の波形は、実際の河川における洪水波形を考慮し、図-4に示す形状とした。ケースU-1とU-2は、洪水継続時間のみ異なり、洪水継続時間($1/\sigma$)で無次元化した経過時間(τ)に関しては、式(1)で表される同一のハイドログラフとなる。

$$D_0 = \left[\frac{\delta(\tau + \alpha)^2}{\tau^2 + \beta} - \gamma \right]^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

ここで、 $D_0 = \tilde{D}_0 / \tilde{D}_p$ 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、実際の洪水を参考に水位ピークが $\tau = 0.2$ において初期水深の3倍程度となるよう、 $\alpha = 0.522$ 、 $\beta = 0.131$ 、 $\gamma = 1.15$ 、 $\delta = 1.03$ とした。なお、洪水継続時間は、ケースU-1が定常流実験での砂州形成時間のほぼ2倍となる8時間、ケースU-2は定常流実験での砂州形成時間とほぼ等しい4時間である。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。河床測定は、測定装置の能力から河床上に水面が無いことが要求されるため通水を停止して行った。しかし、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。すなわち、ケースU-1-1～U-1-8は、洪水継続時間が8時間のハイドロで通水時間の異なるものであり、ケースU-2-1～U-2-8は、洪水継続時間が4時間のハイドロで通水時間の異なるものである。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2670cmから3480cmの8.1mの区間で行った。測点間隔は、横断方向に5mm、縦断方向に水路幅と同じ30cmとした。

各実験ケースの水利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-2および図-3は、ケースU-1とU-2における横断平均水位および横断平均河床の時間変化を表したものである。これらの値は、1/180の勾配を持つ初期河床からの差で表しているが、横断平均水位は若干の勾配を持っていることがわかる。また、図-4に測定区間の平均水深の時間変化を記しているが、(1)式で表される当初期待した水位の時間変化とは異なったハイドロになったことを示している。これは、特にケースU-2で著しいことから、上流の給水層で流水の貯留が生じ予定したハイドロとならなかったものと考えられる。しかし、水面勾配は1/169～1/204であり、概ね当初想定していたハイドロを再現できたものとする。河床は、全体的に上昇あるいは低下しているが初期設定勾配をほぼ維持している。

図-6は、各ケースで測定された河床形状のコンター図である。両ケースとも通水後約30分のU-1-2およびU-2-3で不明瞭ではあるが交互砂州の形成が認められる。その後の時間帯で徐々に交互砂州が明確になる様子が記されている。しかし、洪水継続時間が4時間のケースU-2において、通水後134分経過のU-2-6において、交互砂州が不明瞭になる結果が得られた。

水深の時間変化と砂州形成過程との関係を見るため、

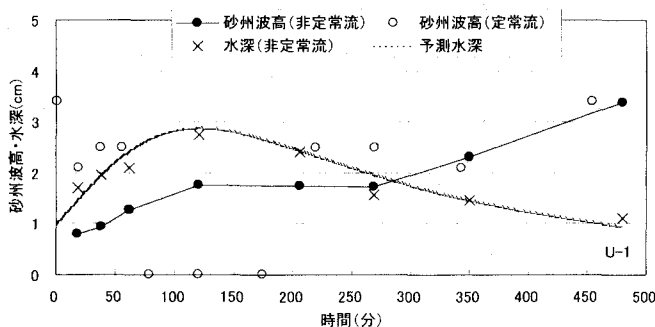


図-4 非定常流実験の水深および砂州波高の時間変化

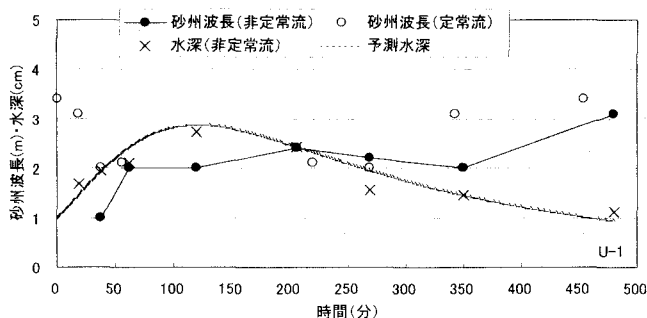
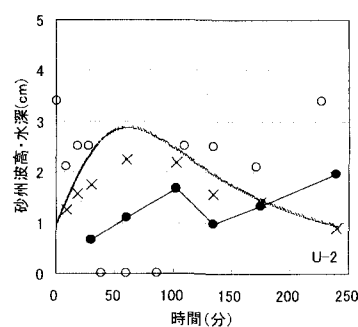


図-5 非定常流実験の水深および砂州波長の時間変化

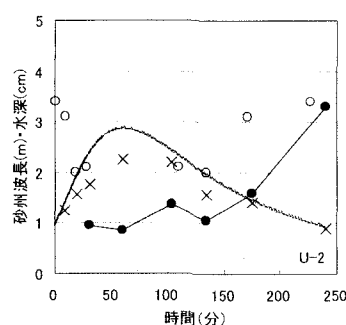


図-4および図-5に砂州波高および砂州波長の時間変化を記した。また、定常流実験の砂州波高および波長についても、非定常流実験における瞬時の水理量がどのようなものであるかをイメージするため、水深が非定常流実験において同じ水深となる時間に併記した。ケースU-1、U-2とも、通水初期には時間とともに砂州波高および砂州波長が概ね増加しているが、その後一定あるいは減少傾向をみせて、さらに増加に転じる傾向を示している。

ケースU-1の砂州波高に着目すると、定常流実験で砂州の形成が認められなかった水深に達した後も水位ピーク生起時刻まで成長し続け、定常流実験で砂州の形成が認められた条件になった後も砂州波高は変化せずやや減少する傾向を示した。通水後300分経過頃に再度成長し始め通水停止時刻である480分で定常流実験により得られた砂州波高と同程度の波高に至っている。また、洪水継続時間がU-1の半分であるU-2においても、砂州の成長の概略的傾向はU-1とほぼ同じであるが、砂州の波高が減少する時間が、洪水波形との対比で見ると、U-1に比較して遅れて出現し、減少の規模も大きいものとなっている。また、通水停止時刻においても、定常流の砂州波高まで成長しきっていない。このように、砂州の波高に関しては、洪水により砂州が形成されない条件になる水理量の影響が時間遅れを伴って出現しているようであり、その傾向は洪水継続時間が短い場合の方が顕著に表れる結果となった。

一方、ケースU-1の波長は、通水1時間ほどで定常流実験で得られた砂州波長とほぼ同じものとなり、定常流実験で砂州が形成されなかった水理条件の期間中およびその後の通水後350分まではほぼ一定の値を示した後、定常流実験とほぼ同じ長さに成長している。ケースU-2では、

波長が長くなる途中で砂州が形成されない条件となったため、定常流実験に比べて短い波長で経過し、砂州波高が増加に転じる時点と同一の時間に成長を再開し、定常流実験と同じ砂州波長に至っている。砂州波長は、砂州が形成されない条件の期間中その直前の波長を維持し、その期間は、砂州波高の成長が停止する時間とほぼ等しい結果となった。

3. 線形安定解析による検討

洪水を模した非定常流の下での砂州形成過程が、定常流の場合と異なる結果が得られたことから、渡邊ら⁴⁾が行った非定常流における交互砂州の線形安定解析を用いて検討を行うこととする。

非定常2次元浅水方程式と連続の式および掃流砂を対象とした流砂連続式について、各諸量の値を洪水波によって決定される基準量と砂州形成に伴う摂動量とに分け線形解析を行うと、洪水初期水深($\bar{D}_0$)で無次元化された水深の摂動量の振幅($\hat{D}_1$)について式(2)が得られる。

$$\frac{\partial \hat{D}_1}{\partial t} - \Omega_s(d_{sB}, \beta_B, \vartheta_B, D_0, \lambda) \hat{D}_1 = 0 \quad (2)$$

ここで、 $t : \bar{U}_{0B}/\bar{B}$ で無次元化された時間である。なお、添え字のBは洪水初期の値を示している。式(2)の解について、流れを定常とした場合式(3)となり従来と同様の解^{5),6)}となる。しかし、 D_0 が時間の関数で表される場合すなわち非定常流においては、式(4)となる。

$$\hat{D}_1 = \exp[\Omega_s t] \text{ const.} \quad (3)$$

$$\hat{D}_1 = \exp\left[\int \Omega_s dt'\right] \text{ const.} \quad (4)$$

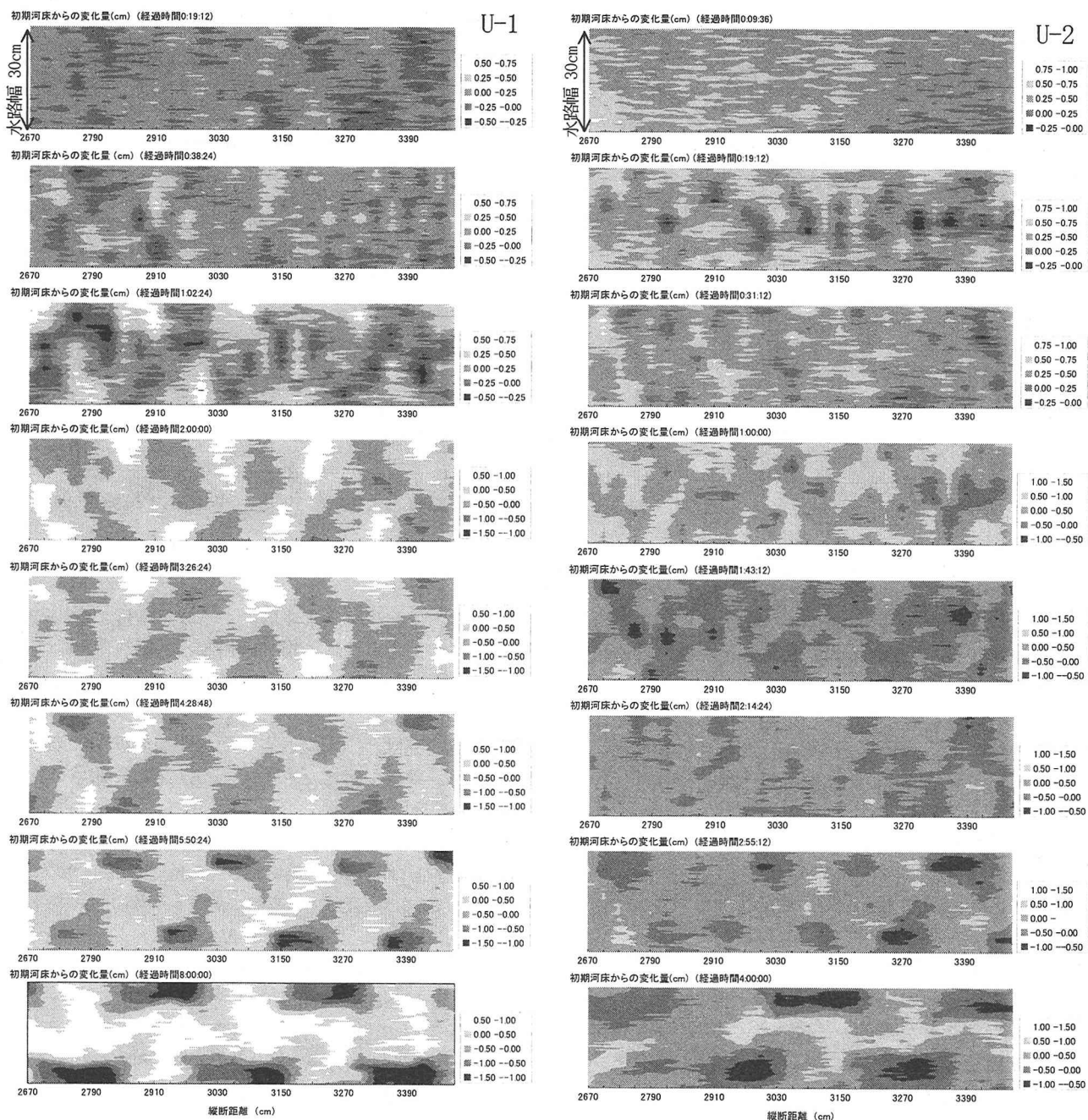


図-6 非定常流実験の河床コンター図

定常流の場合、交互砂州の増幅率は Ω_s であり、非定常流の場合は、 Ω_s を時間で積分した形($\Omega_u = \int \Omega_s dt$)となっている。このことは、砂州の発達を表す1次オーダーの摂動量に0次オーダーである0次の水位変化が強制項として働き、非定常流における砂州の発達が流れの履歴効果を受けることを示している。

この理論は線形解析であるため、直接砂州波高との比較はできないが、実験で得られた砂州の形成過程と安定解析による増幅率とを比較することとする。解析に用いた C_f は今回の定常流実験で得られた結果を基にした式(5)を用いるとともに、無次元掃流砂量(ϕ)は式(6)で表されるVan Rijn⁷⁾の式を用いている。

$$C_f = 0.0113 g^{0.069} \quad (5)$$

$$\phi = 0.053 \left(\frac{g' - g_c}{g_c} \right)^{2.1} \left(\frac{\tilde{v}^2}{s g \tilde{d}_s} \right)^{0.1} \quad (6)$$

ここで、 g' ：有効無次元掃流力、 $\tilde{v}$ ：水の粘性係数、 s ：砂粒子の水中比重、 $\tilde{g}$ ：重力加速度である。

砂州波高の比較を図-7、卓越砂州波数の比較を図-8に示した。卓越砂州波数について、解析結果は実験値の概略の傾向を示すに留まっているが、砂州波高の時間変化と非定常流における増幅率の時間変化とはほぼ一致しており、その比も時間的にほぼ一定(1:0.08)でかつ両実験で一致している。

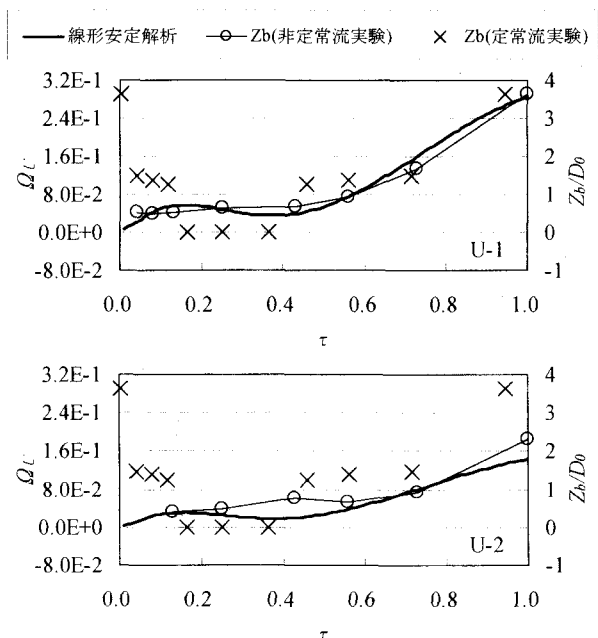


図-7 増幅率と砂州波高の比較

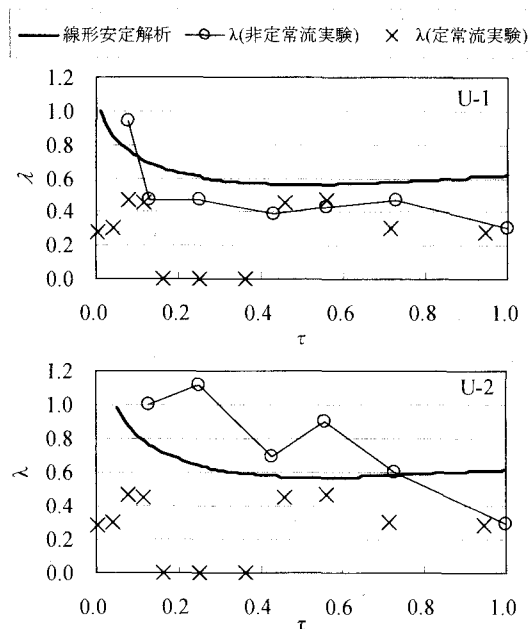


図-8 卓越砂州波数の比較

砂州の形成過程を、瞬間瞬間の砂州の増幅率を積分する非定常流における線形安定解析結果で、ある程度説明することができたことは、洪水時の砂州の形成が流れの履歴効果の影響を強く受けることを示すものである。すなわち、実験において水位の変化に遅れて砂州波高の変化が出現したことは、この履歴効果で説明付けられる。

4. おわりに

河道災害の原因や河川環境を形成する基盤として、砂州の洪水時の挙動を把握することは極めて重要である。このため、洪水を模した非定常流の下での砂州形成実験を実施したが、その挙動は定常流の下での砂州の挙動と大きく異なることが明らかとなった。また、実験結果を線形安定解析の結果と比較することにより、砂州の形成は流れの履歴効果を強く受けることが判明した。

非定常性の表現として、砂州の発達速度 $\tilde{Z}_b/\tilde{t}_c$ と洪水による水位変動速度 $\Delta D\tilde{D}_0/(\tau_p/\tilde{\sigma})$ との比 ϕ をとることが考えられる。ここで、 $\tilde{t}_c$ ：砂州発達時間、 $\Delta D = (\tilde{D}_p - \tilde{D}_b)/\tilde{D}_0$ 、 $\tau_p/\tilde{\sigma}$ ：最大水位生起時間である。 $\tilde{t}_c$ に藤田ら⁸⁾の式(7)を用いると、 ϕ は式(8)で表される。

$$\tilde{t}_c = \frac{3\tilde{B}\tilde{Z}_{be}}{\phi} \quad (7)$$

$$\phi = 3\beta \frac{\Delta D}{\tau_p} \frac{\tilde{D}_0}{\phi\sqrt{s d_s^3 \tilde{L}}} \quad (8)$$

ここで、 $\tilde{\phi} = \phi\sqrt{s g \tilde{d}_s^3}$ 、 $\tilde{L}$ ：洪水波の波長である。式(8)によると、洪水波の幾何学的相似や川幅水深比、流砂量比等とともに洪水波長と水深の比も非定常性のパラメータとして考えられる。しかし、本論文では実験が2

例に留まっており、洪水波形による非定常性の違いや扇状地河川でよく見られる複列砂州等への影響については今後の課題となっている。

謝辞：本研究は、国土交通省北海道開発局の受託業務による補助を受けて行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 巖倉啓子，船木淳悟，馬場仁志：流況の変化が河道内植生に及ぼす影響に関する一考察，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第7部，pp.554-555，1998。
- 2) Tubino, M. : Growth of alternate bars in unsteady flow. Water Resources Research, Vol.27, No.1, pp37-52, 1991.
- 3) 三輪浩，池田香織，谷和憲：正弦波状流量変化による交互砂州の発達・変形過程，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集第2部，pp.540-541，2000。
- 4) 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。
- 5) Colombini, M., G. Seminara and M. Tubino : Finite amplitude alternate bars. Journal of Fluid Mechanics, Vol.181, pp213-232, 1987.
- 6) 渡邊康玄，M. Tubino：掃流砂・浮遊砂を伴う流れの交互砂州発生に関する研究，土木学会水工学論文集第36巻，pp7-14，1992。
- 7) Van Rijn, L. C. : Sediment transport, part I: bed load transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.110, No.10, ASCE, 1984.
- 8) 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-2，1981。

(2001. 10. 1受付)