

複列砂州のモード減少過程に関する水理実験

EXPERIMENTAL STUDY ON MODE REDUCTION PROCESS OF DOUBLE-ROW BARS

渡邊康玄¹・桑村貴志²

Yasuharu WATANABE and Takashi KUWAMURA

¹正会員 博(工) 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)

Hydraulic experiments were conducted in order to clarify the mechanisms of mode reduction process of sand bars. Hydraulic conditions of these experiments were set large width-depth ratio. The following facts became clear by these experiments. Starting time of the mode reduction becomes late and time to spend on the mode reduction has the tendency which becomes long, when a width-depth ratio becomes large. One of two scoured area near side walls in double-row bars is buried and single-row bars are formed.

Furthermore, the prominence wave number of the bed form is analyzed. It is possible that the single row bars formed by mode reduction from double row bars are the same with the single row bars which are formed from the early stages of experiments on the bed form characteristics. Time changes of amplification of $(\alpha_{21} + \alpha_{40})$ and $(\alpha_{11} + \alpha_{20})$ have contributed greatly to the mode reduction process.

Key Words : Alternate bars, double-row bars, mode reduction process, bed forms

1. はじめに

実河川における砂州の形成の特性を把握することは、砂州が河岸侵食や河床洗掘を引き起こすことから防災上きわめて重要なことであるとともに、多様な生物の生息場を形成するという点から河川環境上も必要不可欠な事項となっている。主に防災上の立場から砂州形態に関する研究が従来より多く行われてきており、その特性は明らかになってきている。この中で、砂州の形成過程において、初期に多モードの砂州が形成される条件では、時間の経過に伴ってモードが減少することが水理実験や数値シミュレーションによって指摘されている^{1,2,3)}。一方、各河川の水理量や実際に計測されている河床形状を基に、河道の維持管理や計画立案の際に対象となる砂州形態を単列砂州やモード減少前の複列砂州と表現して砂州形態を分類してきている^{4,5)}が、長期間にわたり流れが河床の形状を作ってきた実河川における河床形態の形成は複列砂州が形成されるとされる水理条件下であっても、モード減少を生じた結果あるいはモード減少中の特性を有していると考えられる。このため、分類されている砂州形態のモードと砂州形態とが結びつかない場合が存在する。

本研究では、水理実験や数値シミュレーションにより指摘されているモードの減少と実河川における河床形態の区分について着目し、実河川における砂州形態の形成過程を明らかにすることを目標として、川幅水深比が比較的大きい条件での定常流による水理実験を行い、砂州形態のモード減少過程について検討を行ったものである。

2. 砂州形成実験の概要

流量 $\bar{Q}$ を一定に保ったまま長時間通水し砂州形状がどのように変化するかを把握する目的で、同一水理条件(シリーズ)で通水時間 $\bar{t}$ を変えた実験を行った。水理条件は、単列砂州が形成されるとされる領域と複列砂州が形成されるとされる領域の複数を設定した。実験に用いた水理条件を表-1に示す。実験に用いた水路は、長さ50m、幅 $2\bar{B}$ が0.9mの直線水路である。なお、河床は粒径 $\bar{d}_s$ が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、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ている。所定の時間を通水した後、水路

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	d_s	ϑ	中規模 河床形態	$\tilde{L}_b$ m	$\tilde{Z}_b$ cm	λ	Z_b
S-10-20	1660	0.59	20	1/86	1/80	0.0069	76	0.13	0.055	複	2.42	2.1	1.17	3.56
S-10-40	1660	0.62	40	1/82	1/80	0.0084	73	0.12	0.060	複	2.66	2.1	1.06	3.39
S-10-60	1660	0.46	60	1/83	1/80	0.0034	98	0.17	0.044	複	2.56	2.2	1.10	4.78
S-10-80	1660	0.36	80	1/84	1/80	0.0016	125	0.21	0.034	複+単	3.76	2.5	0.75	6.94
S-10-120	1660	0.61	120	1/83	1/80	0.0079	74	0.12	0.059	複+単	5.83	2.6	0.48	4.26
S-10-240	1660	0.49	240	1/84	1/79	0.0040	92	0.16	0.047	単	3.30	4.8	0.86	9.80
S-10-480	1660	0.50	480	1/84	1/79	0.0043	90	0.15	0.047	単	6.60	5.2	0.43	10.40
S-10-960	1660	0.60	960	1/80	1/78	0.0078	75	0.13	0.060	単	4.88	4.3	0.58	7.17
S-20-20	3250	1.15	20	1/84	1/80	0.0136	39	0.07	0.109	複	2.70	2.1	1.05	1.83
S-20-40	3250	0.96	40	1/85	1/80	0.0078	47	0.08	0.090	複+単	2.68	2.4	1.06	2.50
S-20-60	3250	0.86	60	1/84	1/79	0.0057	52	0.09	0.082	複+単	3.53	3.7	0.80	4.30
S-20-80	3250	1.10	80	1/85	1/80	0.0118	41	0.07	0.103	複+単	5.89	3.4	0.48	3.09
S-20-120	3250	0.96	120	1/84	1/80	0.0079	47	0.08	0.091	単	5.41	4.3	0.52	4.48
S-20-240	3250	0.91	240	1/84	1/79	0.0067	49	0.08	0.086	単	7.50	5.6	0.38	6.15
S-20-360	3250	0.96	360	1/83	1/79	0.0080	47	0.08	0.092	単	6.83	4.5	0.41	4.69
S-20-840	3250	1.00	840	1/82	1/80	0.0092	45	0.08	0.097	単	8.18	5.5	0.35	5.50
S-30-20	5270	1.20	20	1/83	1/80	0.0060	38	0.06	0.115	複	4.65	2.8	0.61	2.33
S-30-40	5270	1.37	40	1/85	1/79	0.0086	33	0.06	0.129	複+単	5.40	6.1	0.52	4.45
S-30-60	5270	1.27	60	1/84	1/78	0.0070	35	0.06	0.121	単	6.00	5.2	0.47	4.09
S-30-80	5270	1.39	80	1/85	1/81	0.0090	32	0.05	0.130	単	6.30	5.2	0.45	3.74
S-30-120	5270	1.20	120	1/83	1/79	0.0060	38	0.06	0.115	単	5.48	4.7	0.52	3.92
S-30-240	5270	1.15	240	1/86	1/81	0.0051	39	0.07	0.107	単	5.78	5.3	0.49	4.61
S-30-600	5270	1.20	600	1/85	1/76	0.0058	38	0.06	0.113	単	8.40	6.1	0.34	5.08
S-40-20	7600	1.64	20	1/84	1/80	0.0072	27	0.05	0.156	複	2.87	2.1	0.99	1.28
S-40-40	7600	1.78	40	1/85	1/81	0.0091	25	0.04	0.167	単	5.70	6.3	0.50	3.54
S-40-60	7600	1.80	60	1/85	1/80	0.0094	25	0.04	0.169	単	4.39	3.6	0.64	2.00
S-40-80	7600	1.84	80	1/84	1/80	0.0102	24	0.04	0.175	単	5.78	5.1	0.49	2.77
S-40-120	7600	1.63	120	1/86	1/80	0.0069	28	0.05	0.151	単	7.80	5.4	0.36	3.31
S-40-180	7600	1.60	180	1/87	1/81	0.0065	28	0.05	0.147	単	9.45	5.2	0.30	3.25
S-40-330	7600	1.50	330	1/83	1/83	0.0056	30	0.05	0.144	単	6.80	5.8	0.42	3.87
S-50-20	10350	2.02	20	1/85	1/80	0.0072	22	0.04	0.190	単	4.80	3.1	0.59	1.53
S-50-40	10350	2.03	40	1/86	1/79	0.0072	22	0.04	0.188	単	4.20	2.6	0.67	1.28
S-50-60	10350	2.10	60	1/83	1/80	0.0083	21	0.04	0.202	単	5.03	4.0	0.56	1.90
S-50-80	10350	1.91	80	1/86	1/82	0.0060	24	0.04	0.177	単	6.38	5.1	0.44	2.67
S-50-120	10350	1.82	120	1/84	1/81	0.0053	25	0.04	0.173	単	5.93	5.5	0.48	3.02
S-50-240	10350	1.80	240	1/79	1/82	0.0055	25	0.04	0.182	単	6.68	5.6	0.42	3.11

下流端の10.5m上流から26.25m上流までの縦断距離で約15mの区間について、縦横断方向それぞれ15cmおよび5mm間隔で河床を測定した。レーザーによる河床の測定には通水を一旦停止する必要がある。しかし、砂州の形成の連続性を保つことから、同一の水理条件のケースにおいて、河床測定のために一旦通水を停止させた後にそのまま通水を開始し砂州の形成を継続させるのではなく、河床を平坦に均して最初から通水することとした。すなわち、各ケースとも途中で通水を停止することなく所定の時間まで通水を継続したものとなっている。また、各シリーズ（同一水理量の実験群）毎の最長通水時間のケースS-10-960、S-20-840、S-30-600、S-40-330、S-50-240は、河床がほぼ平衡に達したと判断したものであり、通水停止後河床をセメント粉を薄くふりかけることにより

固定し、固化した後に水位および流速の測定も行った。なお、表-1において、 $\tilde{D}_0$ は水深、 I_w は水面勾配、 C_f は摩擦係数、 $d_s = \tilde{d}_s / \tilde{D}_0$ 、 ϑ は無次元掃流力である。

3. 実験結果

(1) 河床形態と流れ

実験S-50のシリーズを除く各シリーズとも通水初期に複列砂州が形成された。観測された砂州形態および砂州の波高 $\tilde{Z}_b$ と波長 $\tilde{L}_b$ について表-1に併記した。なお、表中の λ は砂州の無次元波数（ $= 2\pi\tilde{b} / \tilde{L}_b$ ）であり、 Z_b は砂州の無次元波高（ $= \tilde{Z}_b / \tilde{D}$ ）である。複列砂州が形成されたシリーズについては、通水時間の長いケースは、複列砂州が単列砂州へとモード減少した。河床測定区間全体にお

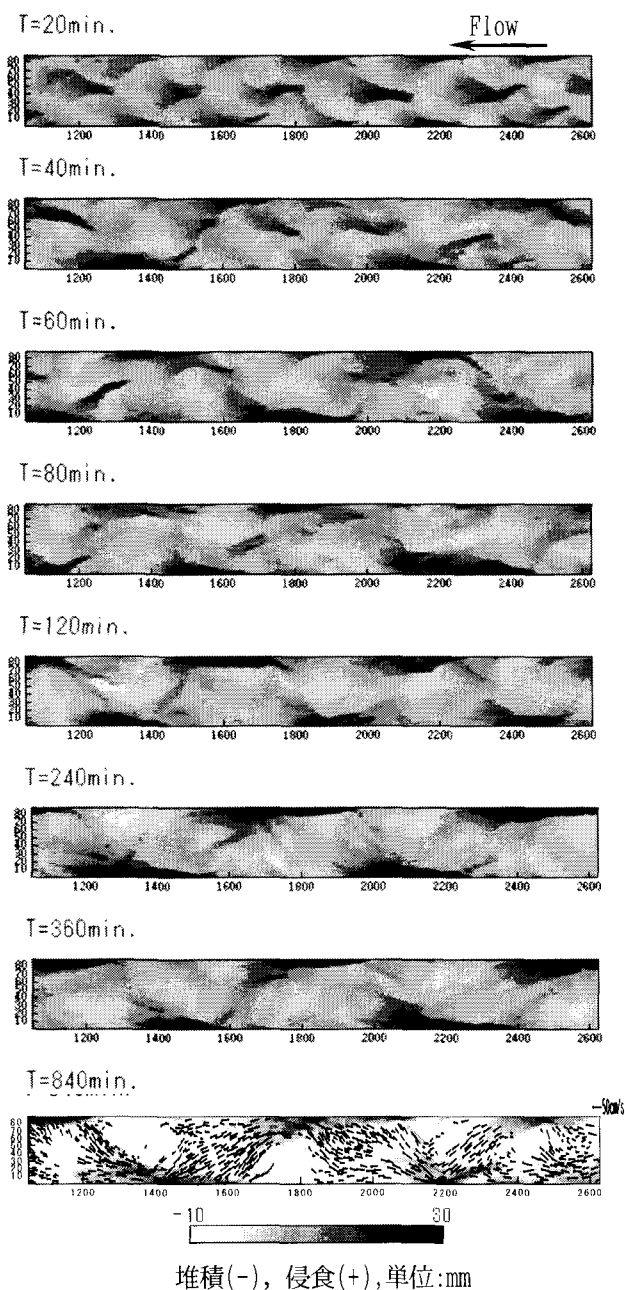


図-1 河床形状の時間変化 (シリーズS-20)

けるモードの減少にはある程度の時間を要しておりS-10-80, S-10-120, S-20-40, S-20-60, S-20-80, S-30-40では, 複列砂州と単列砂州とが共存するかたちとなっていた。また, モードの減少する時期は水深の小さいシリーズほど遅くなりかつその時間も長くなる傾向を示した。これは, 水深の小さい実験が相対的に掃流砂量が小さく, 砂州の発達過程も遅いためである。モードの減少過程をシリーズS-20とシリーズS-40を例にとり図-1, 2にコンター図の変化で示した。また, 河床が平衡に達したと判断されるS-20-840とS-40-330のコンター図には, 測定された流速のベクトルを重ねて示している。複列砂州から単列砂州へのモード減少の過程は, 複列砂州で形成された水路側両壁付近に形成された同一断面内の洗掘部の一方が縦断的に交互に埋め戻されるとともに, 複列

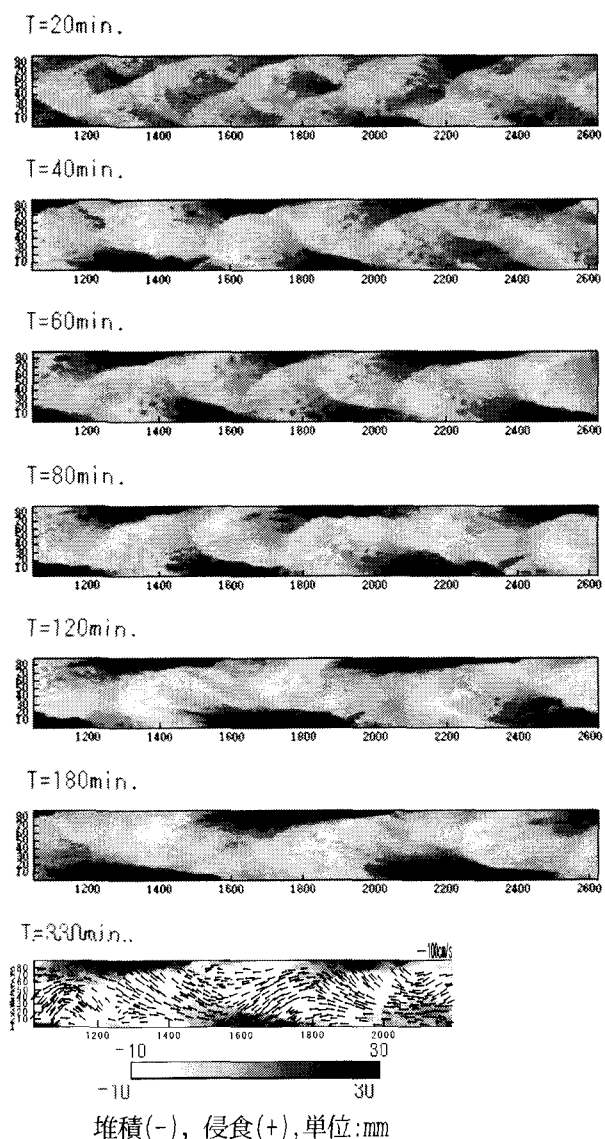


図-2 河床形状の時間変化 (シリーズS-40)

一般的な交互砂州上の流れ(S-40-330)

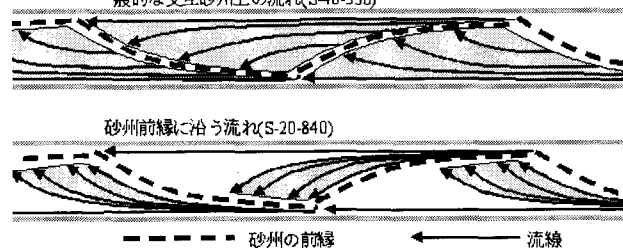


図-3 砂州上の流れの模式図

砂州の水路横断方向中央の洗掘部が, 埋め戻されない水路壁側の洗掘部に統合されていることが図-1から読み取れる。このことは, シリーズS-10, S-30でも同様であった。また, 河床形状が平衡に達したS-20-840では, 河床が縦断的に交互に洗掘部が形成される交互砂州の形状を示しているが, 流れは交互砂州の前縁に沿う流れと側壁に沿う流れが形成されており, S-40-330に見られるような交互砂州の前縁を横切る一般的な交互砂州上の流れとは異なっている。交互砂州の前縁に沿う流れは, 蛇行した“溝筋”を形成し, 蛇行流路の様相を呈している。こ

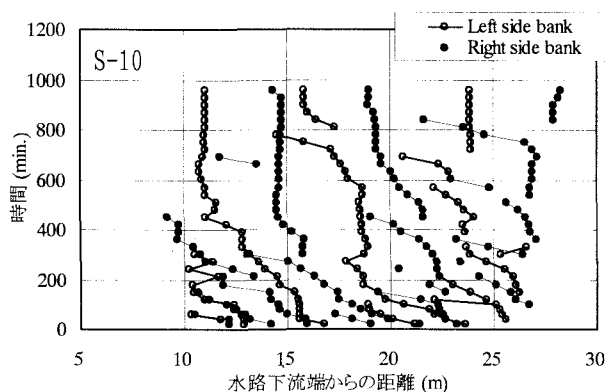


図-4 砂州前縁位置の時間変化 (S-10-960)

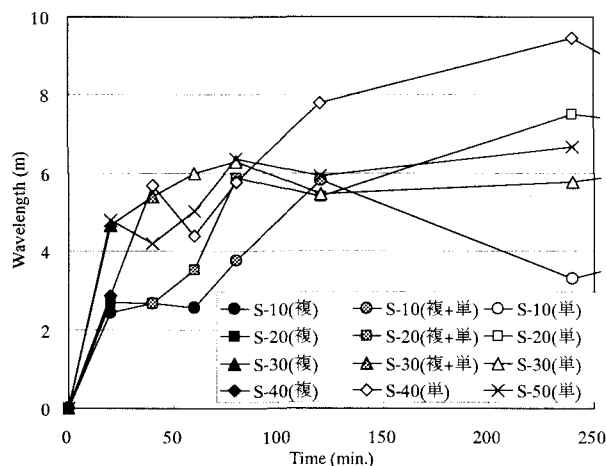


図-6 砂州波長の通水初期における時間変化

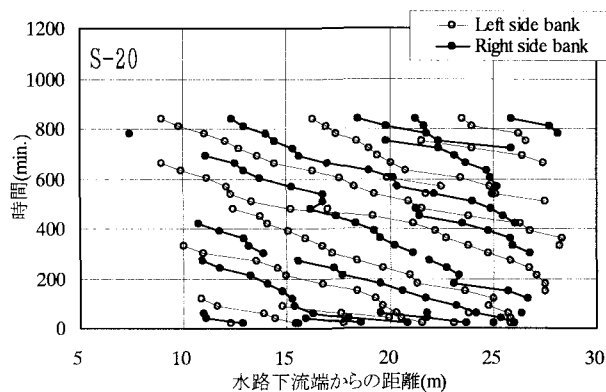


図-5 砂州前縁位置の時間変化 (S-20-840)

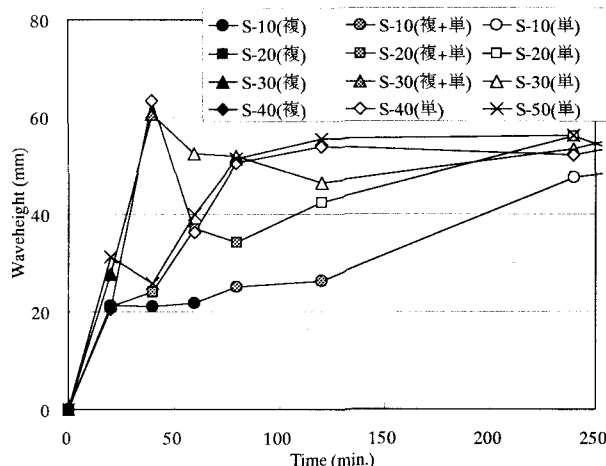


図-7 砂州波高の通水初期における時間変化

の流れは、水深の最も小さいシリーズであるS-10-960においても見られた。以上のS-40-330とS-20-840の流れの特徴を模式的に表したものが図-3である。S-20-840において流線の記載がない白い箇所はきわめて弱い流れの部分である。S-10-960ではこの部分が浮州となり、流れが主流の砂州前縁を通る流れと側壁沿いの弱い流れに集中し砂州の前進も停止した。図-4および5は、それぞれシリーズS-10とS-20の砂州の前縁の位置の時間変化を示したものであるが、浮州の形成されたS-10では、浮州の形成と同時に（通水から約500分後）に砂州の前進が停止していることが示されている。

(2) モード減少と河床波の波長と波高

シリーズS-10では、通水後約80分後から120分後、シリーズS-20では40分後から80分後、シリーズS-30およびS-40では約60分および30分頃に複列砂州から単列砂州へのモード減少が生じている。現象の理解のため、砂州の発達と比較的遅く相対的に長い時間をかけてモード変化が生じているシリーズS-10とS-20に着目して、モード減少時の砂州波長と波高の時間変化を見ることとする。図-6および7は、それぞれ砂州の波長と波高の時間変化を示したものであるが、波長および波高とも約15mの観測区間において形成された複数の砂州の平均値を示している。シリーズS-10およびS-20とも砂州波長および波高

が一旦複列砂州として平衡状態に達した後、遷移期間を経て単列砂州へと移行している。砂州波長は、前項で述べたように複列砂州の片側の洗掘部が埋め戻される形でそれぞれの砂州がモード減少しているため、徐々に波長が伸びる結果となっているのに対し、砂州波高は流砂が洗掘部の埋め戻しに使用されていることから、遷移時期においては発達が抑制され波高が大きく変化していない。なおモードの減少が終了した後、波高は再度発達している。複列砂州から単列砂州へのモード減少時に複列砂州の平衡状態が現れる現象は、藤田ら²⁾が行った砂州の各モードにおける初期増幅率の考察とも一致している。しかし、流砂量の相対的に大きいシリーズS-30およびS-40ではこの遷移過程が明瞭に現れず、複列砂州から単列砂州へと短時間にモード減少が進行している。

4. 河床の形状特性

河床波の形状特性を把握するため、長谷川らが用いた河床波の波数解析⁶⁾を行う。すなわち、水深で無次元化された初期河床からの変動量 η を式(1)で表現し、各波の振幅 α_{ij} の大きさを検討することとした。

$$\eta = \sum \sum \alpha_{ij} \sin \left(i \frac{2\pi}{2B} \tilde{y} - \frac{\pi}{2} \delta_{ic} \right) \cos \left[j \frac{2\pi}{L_b} (\tilde{x} - \tilde{\delta}_{ij}) \right] \quad (1)$$

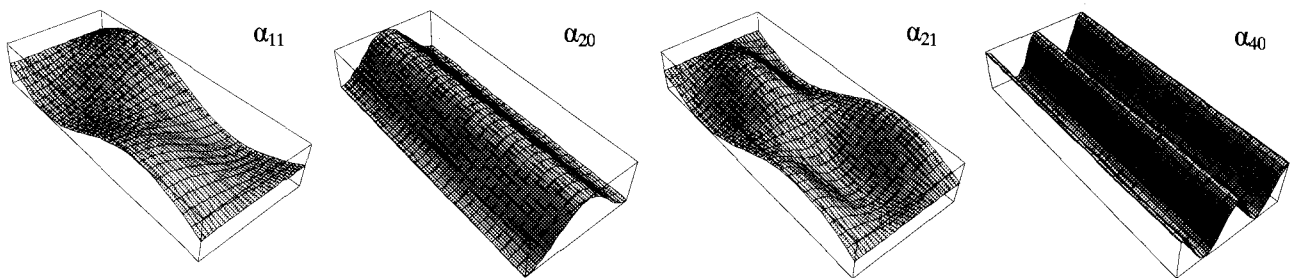


図-8 河床波の主要成分の模式図

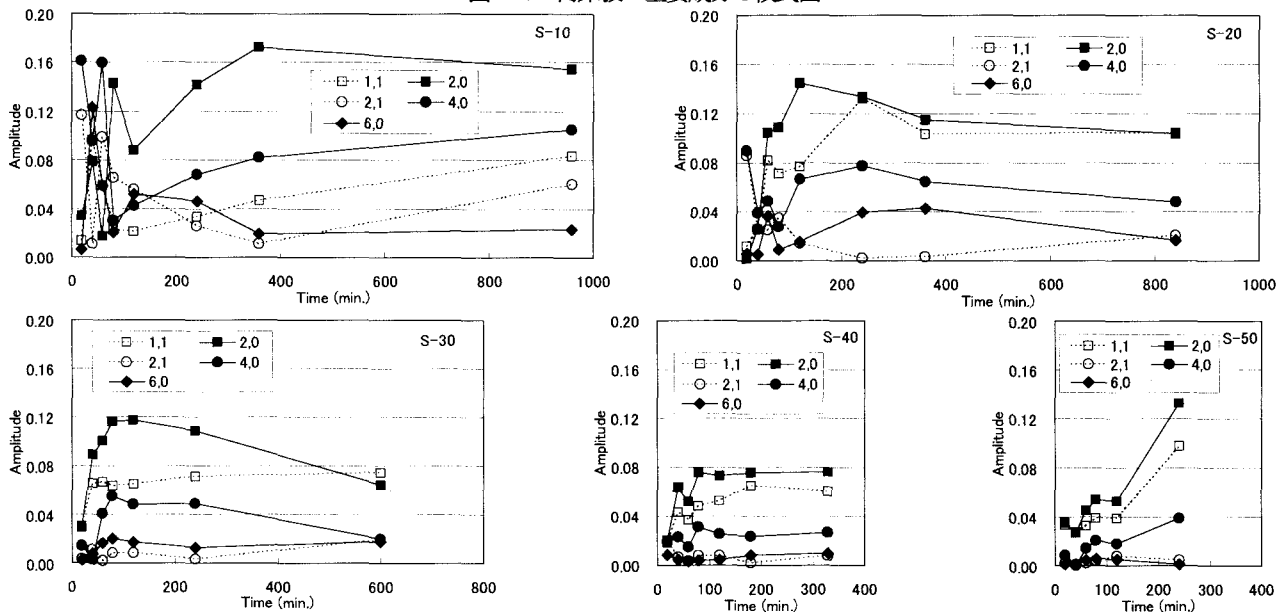


図-9 各シリーズにおける主要波成分の時間変化

ここで、 i, j はそれぞれ横断方向 $\bar{y}$ および縦断方向 $\bar{x}$ の波数、 δ_{ij} は波数 ij の位相であり、 δ_{ic} は式(2)で表される。

$$\delta_{ic} = \frac{1 + (-1)^i}{2} \quad (2)$$

各シリーズの河床波について解析を行った結果、主要な成分はほぼ共通しており、 α_{11} 、 α_{20} 、 α_{21} 、 α_{40} および α_{60} であった。各成分の形状を模式的に示したものが図-8である。また、図-9に各シリーズにおける各成分の時間変化を示す。河床形態によって各成分の大きさが異なり、単列砂州が形成されている河床は従来言われているように、 α_{11} と α_{20} が卓越している。一方複列砂州が形成されている河床は、単列砂州の主要成分の横断方向に2倍の波数を持つ α_{21} と α_{40} が大きな値を持っている。しかし、それぞれ2つの成分は各ケースで大きさの割合が変化しているとともに、時間的にも変化している。さらに、複列砂州から単列砂州への遷移期でありこれらが混在しているケースでは、前述の5つの主要な成分がほぼ同程度の大きさになっている。シリーズS-20とS-40における、複列砂州の形状特性を表す $(\alpha_{21} + \alpha_{40})$ の値と単列砂州の形状特性を表す $(\alpha_{11} + \alpha_{20})$ の値の比の時間変化を示したものが、図-10である。モード減少による単列砂州の形成は、 $(\alpha_{21} + \alpha_{40})$ および $(\alpha_{11} + \alpha_{20})$ の増幅の時間変化で表現できることがわかる。各シリーズで明瞭な複列砂州が形成された通水時間の河床の解析結果を見ると、この値が

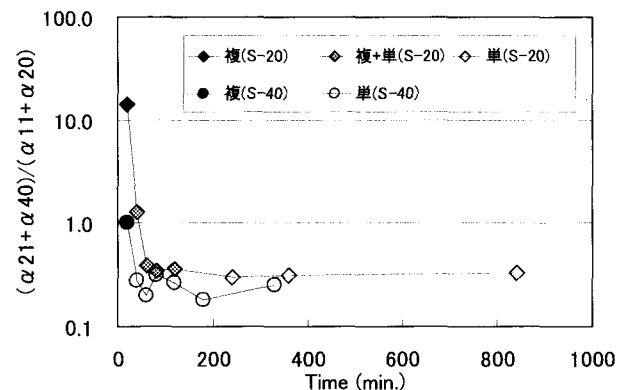


図-10 $(\alpha_{21} + \alpha_{40}) / (\alpha_{11} + \alpha_{20})$ の時間変化

概ね1以上となっている。

次に、平衡状態に達した河床の形状について波数解析の結果を検討する。前述の主要成分を川幅水深比 β で整理したものが図-11である。なお、井口⁷⁾および西谷ら⁸⁾が行った単列砂州実験の結果を解析した長谷川らの結果⁶⁾も合わせて示した。複列砂州からモード減少して形成された単列砂州の解析結果は、単列砂州実験の結果の延長線上に位置している。このことは、浮州が形成され蛇行流路が形成されたシリーズS-10も含めて、モード減少により形成された単列砂州は、通水初期から形成される単列砂州と形状特性では同一と考えることができる。また、モード減少によって形成される単列砂州がモード減

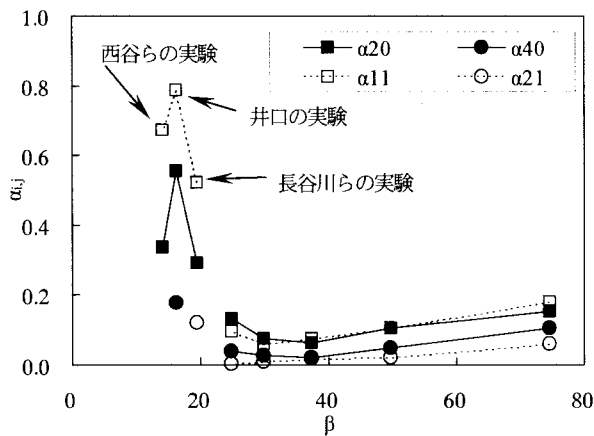


図- 11 平衡河床形状の主要波成分の川幅水深比に対する変化

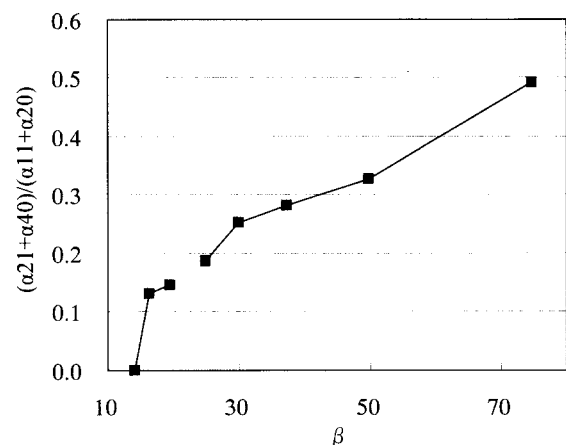


図- 12 平衡河床形状の主要波成分の川幅水深比に対する変化

少する前の複列砂州の形状特性をどの程度有しているかを $(\alpha_{21} + \alpha_{40}) / (\alpha_{11} + \alpha_{20})$ の値として見たものが図-12である。平衡河床形状を対象としているが、この値が0.25程度以下が通水初期から単列砂州が形成された実験であり、それ以上がモード減少して形成された単列砂州となっている。また、川幅水深比が増加するにしたがって $(\alpha_{21} + \alpha_{40})$ の値が相対的に大きくなる結果を得た。

モード減少して形成された単列砂州が、複列砂州の形状特性を表す成分 $(\alpha_{21} + \alpha_{40})$ を比較的高い割合で持っていることから、モード減少した単列砂州においても複列砂州の特徴をある程度持つこととなる。このため、石狩川の支川忠別川における洪水中および洪水前後での航空写真および室内実験結果を用いて桑村ら⁹⁾が指摘するように、洪水時にモード減少により形成された交互砂州では、水位の低い平常時に中島状の河床が水面上に出現することを示している。

一般に複列砂州の領域であるとされる水理条件においても洪水期間が長い場合、複列砂州がモード減少した単列砂州の上を流れる流況となる。しかし、このようにして洪水時に形成された単列砂州の河床には複列砂州の形状特性をある程度持っており、減水期以降の流れは中州を伴う複列砂州上の流れに似たものとなる。複列砂州上の流れと単列砂州上の流れでは同一の流量が流れる場合でも河岸等への流れの集中度合いが大きく異なることから、治水に注意を要することとなる。

5. おわりに

複列砂州からモード減少が生じ単列砂州へ移行する過程の水理実験を行った結果、以下の事項が確認された。

- 1) 複列砂州から単列砂州へのモードの減少する時期は川幅水深比の大きいシリーズほど遅くなりかつ減少に要する時間も長くなる傾向を示した。
- 2) 浮州が形成される場合、形成と同時に砂州の前進が停止する。
- 3) 複列砂州から単列砂州へのモード減少過程は、複列

砂州の片側の洗掘部が埋め戻される形でそれぞれの砂州がモード減少するため、波高が一旦複列砂州として平衡状態に達した後、遷移期間を経て単列砂州へと移行する。

- 4) モード減少により形成された単列砂州は、通水初期から形成される単列砂州と形状特性では同一と考えることができる。
- 5) モード減少による単列砂州の形成は、 $(\alpha_{21} + \alpha_{40})$ および $(\alpha_{11} + \alpha_{20})$ の増幅の時間変化で表現できる。

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) 藤田裕一郎，赤松英樹，村本嘉雄：網状流路の形成過程，土木学会第31回水理講演会論文集，pp.695-700, 1987.
- 2) 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，土木学会水工学論文集第36巻，pp23-28, 1992.
- 3) 竹林洋史，江頭進治：自己形成流路の形成過程と形成水理条件，土木学会論文集，Vol.677，pp75-86, 2001.
- 4) 村本嘉雄，藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と形成条件，土木学会第22回水理講演会論文集，pp.275-281, 1978.
- 5) 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，土木学会論文集，Vol.342，pp87-96, 1984.
- 6) 長谷川和義，山岡勲：発達した交互砂州の性状に関する実験と解析，土木学会第26回水理講演会論文集，pp.31-38, 1982.
- 7) 井口昌平：砂礫堆の形成に関する水理学的考察，東京大学生産技術研究所報告，第14巻，第5号，1966.
- 8) 西谷隆亘，吉野文雄，牧野立平：洪水による河床変動についての実験的研究－真名川の九頭竜川との合流点より上流の8kmの区間について－，法政大学工学部研究集報第9号，1973.
- 9) 桑村貴志，渡邊康玄：忠別川における洪水時の砂州の形成過程について，土木学会第58回年次学術講演会，pp329-330, 2003.

(2003.9.30受付)