

流路網形成過程とそれに伴って形成される蛇行流路における砂州と平面不安定の影響

Influence of bar propagation and bend development to the formation of braided channels and meander channels

島 絵梨子¹・渡邊 康玄²

Eriko SHIMA, Yasuharu WATANABE

¹ 学生員 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

² 正会員 工博 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

In order to stably maintain a river channel, the river channel form needs to suit its origin. Therefore, many researches on the origin of the plane form of a river channel or river width have been conducted. However, the relation between a channel network and meandering shape or a sandbar and the formation process of a channel network is not sufficiently clarified. In this research, in order to clarify these phenomena, a hydraulic model experiment using a wide width flume was conducted and the results were discussed using meandering theory and bar formation theory. As a result, it has been shown that the bars and braided channels may be influenced to some extent by the wave resulting from plane instability.

Key Words: *channel network, braided channels, bars, channel bend, hydraulic experiment, stability analysis.*

1. はじめに

河道を安定的に維持するためには、法線形や川幅等の成因を把握し、それになかった河道とする必要がある。これら流路形態に関して、従来から数多くの研究が行われ、様々な知見が積み重ねられてきている。蛇行形状に関する先駆的な研究として、木下¹⁾の石狩川の蛇行変遷に関する詳細な調査、池田ら²⁾の蛇行発達における卓越波長や位相速度に関する研究や、長谷川ら³⁾の流路変動の数値予測手法に関する研究が挙げられる。流路網に関しては、藤田ら⁴⁾や芦田ら⁵⁾の実験的研究がある。竹林ら⁶⁾は、流路網の時空間変動に関して種々の川幅水深比における数値計算結果から、浮州の存在の重要性を指摘している。また、関根⁷⁾は、側岸浸食が流路の形成発達に大きく寄与していることを指摘している。しかしながら、流路網と蛇行形状や砂州との関係ならびに、それらの形成過程や川幅の決定機構に関する研究は実験例も少なく、実現象では十分に解明されていないのが現状である。このような中、伊賀・長谷川ら⁸⁾は、河川データを用いて、河床形態に対する平面形状と砂州の作用を理論解析の結果と数値計算結果を利用して分析を行い、貴重な情報を提供している。

本研究では、水路側壁による横断方向に対する拘束ができる限り小さい場合の水理実験を行い、平坦床から形成される流路網ならびに蛇行流路の基本的な形状特性を把握するとともに、伊賀・長谷川ら⁸⁾の研究を

表-1 実験条件

実験番号	水深 (m)	流量 (m ³ /s)	無次元掃流力
Case1	0.0050	0.00177	0.040
Case2	0.0072	0.00330	0.058

参考に Blondeaux・Seminara⁹⁾の蛇行理論を用いて、流路網の形成機構および形成された蛇行流路の特性を把握することとした。なお、諸条件を単純化させ、基本的な知見を得るために、今回は一定流量で実験を行なっている。

2. 実験手法及び結果の概要¹⁰⁾

流量を一定に保ったまま長時間通水した場合に、流路形状がどのように変化していくのかを把握することが本実験の目的である。このため、水路側壁による横断方向への拘束ができる限り小さくなるように水深に対して川幅が十分に広く設定できる、長さ 14m、幅 1.6m の直線水路を用いた。使用した河床材料は、平均粒径 d_m が 0.765mm の均一な 4 号珪砂である。この河床材料を水路上流端から下流 12m まで河床勾配を 1/100 とし敷き詰めた。また、水路の上下流端には初期河床高と同じ高さの固定堰を設置している。

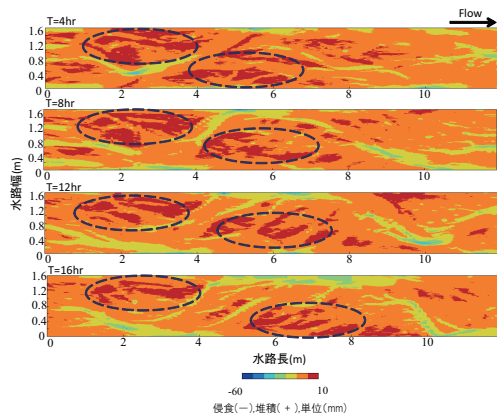


図-1 Case1 流路形状時間変化

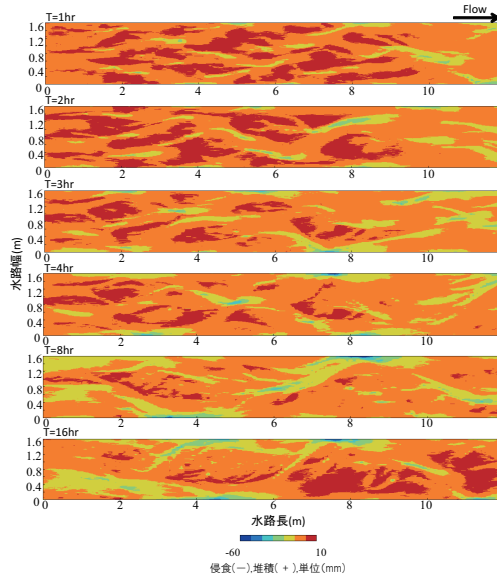


図-2 Case2 流路形状時間変化

(1) 水理条件

実験条件は表-1 に示すように、初期の無次元掃流力 τ_* が限界掃流力 τ_{*c} をわずかに上回る ($\tau_*/\tau_{*c} = 1.05$) 場合と、初期の τ_* が τ_{*c} の 1.5 倍程度になる場合の 2 ケースとした。両ケースの通水時間は、Case1 において形成された流路が水路側壁に到達してからある程度時間が経過した 16 時間である。なお、今回の実験は現象を単純化するため、河床材料が掃流状態で移動する場合を対象としており、水深粒径比は 10 程度である。実河川としてはこの値が比較的小さい場合における現象を扱っていることとなる。土砂供給条件については、上流の堰直下流の河床高が低下しないように目視で給砂を行っており、上流端での河床高がほぼ動的平衡となるようにしている。

(2) 河床形状の時間変化

Case1 および Case2 における、上流端から下流 11.9m までの河床形状の変遷過程をコンター図で示したものが図-1、図-2 である。両ケースとも上流端から 4m および 10m から下流端は、水路中央部の洗掘、堆積の傾向が大きく異なっており、水路上下流端の影響を受けているものと推察される。このことから、この区間に

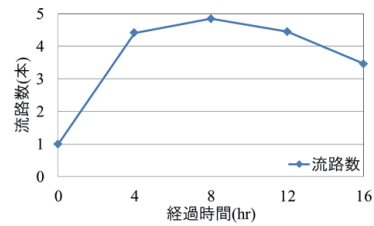


図-3 経過時間毎の流路数平均値

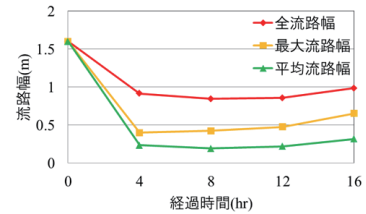


図-4 経過時間毎の流路幅平均値

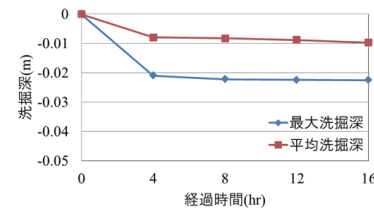


図-5 経過時間毎の洗掘深平均値

については検討から除外することとした。Case1 では、通水初期に多列砂州状の地形が形成されたが、時間経過とともに浮州(図-1 点線部分)が多数存在するようになり、上流からおよそ 2.5m の地点から一波長がおよそ 6m の比較的明瞭な蛇行流路を確認した。なお、通水 12 時間ほどで蛇行流路の曲頂部が水路側壁に到達し、左岸側 4m~10m の区間において、他の部分と比較すると縦断的に広範囲で洗掘している。

Case2 では、Case1 と比較すると現象の進行が早かったため、通水開始から 5 時間目までは 1 時間毎に河床高を測定している。Case1 のような明瞭な浮州の存在や、蛇行形状の流路は見られず、多列砂州が形成され、藤田ら¹¹⁾が指摘しているように、時間経過とともに砂州の列数の減少が生じた。最終的には、波長が概ね 4m の複列砂州が形成された。また、Case1 と比較すると明瞭な流路は形成されていない。

(3) 流路形状の時間変化

Case1 において、浮州の形成に伴う明瞭な蛇行流路を確認したことから、流路形状の時間変化について解析することとした。なお、Case2 は多列砂州が形成されており、明瞭な浮州や流路が形成されていなかったことから、この解析は行っていない。本検討では、実験時における観察と縦断方向に 2m 間隔、横断方向に 3 点(左右岸近傍および流路中央)で測定した水位および写真から明確に流速が存在すると判断された、初期河床から 3mm 以上低下している部分を流路とみなし、各断面における流路数、流路幅、洗掘深の時系列変化を整理した。流路数については各断面における流路数、流

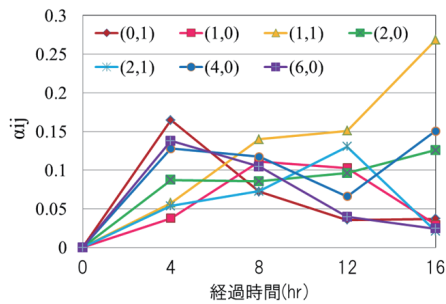


図-6 Case1 主要成分時間変化

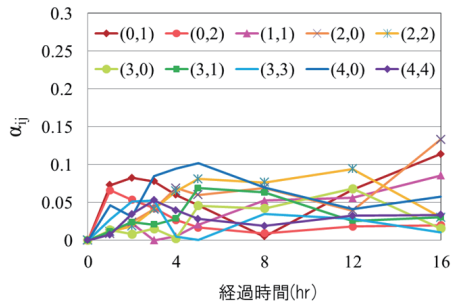


図-7 Case2 主要成分時間変化

路幅については各断面における全流路幅，最大流路幅，平均流路幅，洗掘深については各断面における最大洗掘深，平均洗掘深を経過時間毎に平均している．結果を図-3～図-5に示す．図-3からは，8時間目におよそ4.8本だったものが16時間目にはおよそ3.5本となり，時間経過とともに流路がおよそ1.3本減少していることが分かる．一方，流路幅，洗掘深は時間が経過してもそれほど大きな変化は見られない．

(4) 河床の形状特性

河床の形状特性を把握するため，2重フーリエ解析¹²⁾を行ない，各波の振幅 α_{ij} の大きさを比較することとした．ここで， i は横断方向波数の2倍， j は縦断方向波数を表す．Case1，Case2における経過時間毎に河床波成分を解析した結果をそれぞれ図-6，図-7に示す．なお，解析にあたっては初期河床高からの変化高を平均水深で無次元化したものを使用している．

Case1においては，横断方向にかまぼこ型の形状を示す α_{20} が一定の値を持ち，交互砂州あるいは蛇行形状を示す α_{11} が8時間目以降卓越し，最大値を持っていることが分かる．

Case2においては， α_{22} ， α_{33} ， α_{44} といった多列砂州を示す成分が出現している．4時間目以降 α_{22} が α_{33} の値を上回っていることから，3列砂州から2列砂州への砂州の列数の減少があったことが分かる．

(5) 理論における川幅との比較

流路幅と水量との関係性を結び付けるため，理論的に導かれた渡邊ら¹³⁾の安定解析に基づく基本川幅と，実験で得られた流路幅を比較することにした．なお，基本川幅とは安定解析によって見出された，流量が与え

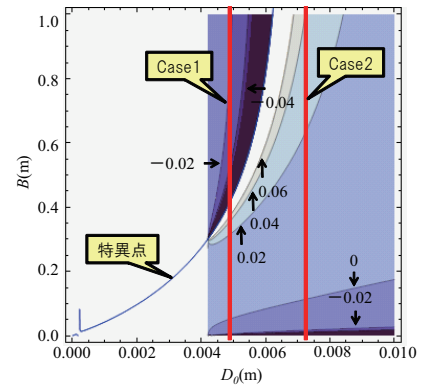


図-8 Case1 及び Case2 時間増幅率コンター図

られたときに理論的に安定するとされる川幅のことである．Case1，Case2における等流水深 D_0 と基本川幅 B に対する時間増幅率 ω のコンター図を図-8に示す．解析で用いた摂動量の縦断方向に対する変化率である r に関してはまだ十分に解明されていないが，本実験の河床勾配が $I=1/100$ であるため，既往研究¹²⁾の成果を踏まえ，最も再現性が高いと判断される $r=0.15$ を適用した．Case1の水理量においては，0.45mにおいて特異点を持つ結果となった．特異点が基本川幅を示すものと考えれば，本実験で使用した水路幅は1.6mであるため，0.45m間隔で流路が集約される場合には，Case1において横断方向に平均3.6本の流路が形成されることとなる．実際に実験で形成された流路数は実験開始から16時間後に平均3.5本であり，理論値とほぼ一致する結果を得た．Case2においては特異点が存在しないため，明瞭な流路が形成されないことを示しているものと考えられ，Case1の現象とは異なる現象が生じたものと判断される．すなわち，Case1においては流路の分岐により明瞭な流路網が形成され，Case2では明瞭な流路網は形成されず，多列砂州が形成されたと推察される．

3. 蛇行流路の成因分析

(1) 検討手法

Case1では明瞭な蛇行流路が形成され，Case2では多列砂州が形成されたことを利用し，Case1で形成された蛇行流路の成因について，砂州との関係も含めて検討を行う．検討手法には，Blondeaux・Seminar⁹⁾による蛇行発達に関する安定解析および，砂州発達に関する安定解析を用いることとした．なお，これらの安定解析は，河道線形および河床に微小な振幅を持つ攪乱を与えることで，その増幅率の比較により卓越する波を求めている．すなわち，現象の極初期の挙動を扱っていることとなる．このことから，現象が進み，蛇行の発達の要因である平面不安定(以降平面不安定と記述)と砂州の発達といった複数の現象の非線形性の高い現象への適用は限界があるものと考えられる．しかしながら，ここでは単純に，これらの理論によって得られた結果と実験結果とを比較することで，平面不安定と

表-2 安定解析に使用した計算条件

実験番号		流路半幅 $B_{1/2}$ [m]	水深 D [m]	無次元掃流力 τ_*	粒径水深比 d_s	川幅水深比	河床形状
Case1	通水初期	0.80	0.0050	0.040	0.153	160	平坦
	通水後期	0.80	0.0067	0.053	0.114	119	3.5~4.8本の流路
	基本川幅	0.23	0.0067	0.053	0.114	34	波長6mの蛇行流路
	平均流路幅	0.10	0.0067	0.053	0.114	15	平均流路幅0.2m
Case2	通水初期	0.80	0.0072	0.057	0.106	111	4列砂州
	通水後期	0.80	0.0099	0.078	0.077	81	2列砂州

表-3 蛇行及び砂州発達に関する安定解析の計算結果

実験番号		安定解析(蛇行)		安定解析(砂州)		形成される砂州 (砂州安定解析)	形成される砂州 (蛇行安定解析)
		λ_m	L_m [m]	λ_b	L_b [m]		
Case1	通水初期	0.90	5.59			非砂州	非砂州
	通水後期	0.68	7.39	7.25	0.69	11列	(単列)
	基本川幅	0.53	2.71	1.80	0.80	3列	単列
	平均流路幅	0.15	4.19	0.70	0.90	単列	非砂州
Case2	通水初期	1.60	3.14	5.30	0.95	8列	2,3列
	通水後期	0.90	5.59	2.60	1.93	4列	2列

砂州の発達それぞれどの程度現象に影響を与えているかを把握する目的で、検討を行うこととした。

(2) 検討に用いた水量

安定解析に使用した計算条件を表-2に示し、Case1、Case2における蛇行および砂州発達に関する安定解析の計算結果について簡潔にまとめたものを表-3に示す。なお、実験では、通水中に河床形状の変化や浮州の形成等で水深が変化したことから、通水後まもなく通水初期、通水終了直前を通水後期とし、検討を行うこととした。また、Case1では水みちとなっている蛇行流路の形成を考慮し、2.5節で得た基本川幅を基準とした場合(以降基本川幅)と実際に測定された流路幅を用いた場合(以降平均流路幅)の検討も合わせて行った。さらに、Case1の通水後期には浮州が存在するとともに水みちが形成されているため、流路幅が水路幅から変化しているが、比較のため水路幅を流路幅とした検討も行っている。安定解析で得られた蛇行波数および砂州波数をそれぞれ λ_m および λ_b 、蛇行波長および砂州波長を L_m および L_b としている。なお、 λ と L の関係は式(1)で表される。

$$\lambda = 2\pi \frac{B_{1/2}}{L} \quad (1)$$

ここで、 $B_{1/2}$ は、水路あるいは流路の1/2の幅である。蛇行および砂州の安定解析における波数 λ と時間増幅率 ω の関係を詳述する。なお、図中の ω_m は蛇行の初期増幅率、 ω_b は砂州の初期増幅率である。

(3) 検討結果

a) Case1

図-9にCase1通水初期の蛇行発達に関する安定解析および砂州発達に関する安定解析結果を示す。蛇行の発達に関しては増幅率が最大値となる $\lambda_m(\lambda_{mp})$ が0.9すなわち波長 L_m が5.59mとなる結果を得たが、砂州の安定解析では特定の波数で増幅率が最大になることはなく、一旦極小値を持った後、波数の増加とともに増幅率

も大きくなる結果となり、一般に砂州と判断される波は発生しない結果となった。砂州の発達が、蛇行の要因となる平面不安定によって影響を受け、蛇行の安定解析における卓越波長 L_{mp} が砂州の卓越波長 L_b を規定するものとして、砂州の安定解析において λ_b を0.9とした場合でも、砂州が発生しない結果となった。これは、Blondeaux, Seminaraら⁹⁾の指摘しているレゾナンス状態である。Case1通水後期には浮州や流路網が形成され流路幅が水路幅ではなくなっているため、本来の意味での蛇行発達や砂州の形成を通水後期における水量で議論することはできないが、水深が河床変化に伴う河床抵抗の変化を受けて、浮州が明確になる前に変化していることも考えられるため、検討を行うこととした。結果を図-10に示す。蛇行の発達で $\lambda_{mp}=0.68$ 、 $L_{mp}=7.39$ mとなり、砂州の安定解析結果では波長が極めて短い11列砂州となる結果を得た。また、Case1通水初期と同様に $\lambda_b=0.68$ とした場合の卓越する河床波は単列砂州となったが、発達の程度は極めて弱い。このように、水深が若干変化しても、レゾナンス状態であることや、波長約6~7mの蛇行が発達する結果は変化しない。したがって、浮州や明確な流路が形成されるまでの状態としては、波長6m程度の蛇行発達が支配的であったものと判断できる。次に2.5節で求められた基本川幅における条件($B_{1/2}=0.23$ m)の場合を考える。図-11に示されるように $L_{mp}=2.71$ m($\lambda_{mp}=0.53$)、 $L_{bp}=0.80$ m($\lambda_{bp}=1.80$)で3列砂州となった。なお、 $\lambda_b=0.53$ の場合の卓越河床波は単列砂州であり、その増幅率は小さい。流路数は実験値とほぼ一致したものの、この解析では実験値との適応性は見られない。実験結果から得られた蛇行流路の平均流路幅($B_{1/2}=0.10$ m)を用いた場合には、図-12に示されるように $L_{mp}=4.19$ m($\lambda_{mp}=0.15$)、 $L_{bp}=0.90$ m($\lambda_{bp}=0.70$)をそれぞれ得た。なお、 $\lambda_b=0.15$ とした場合には河床波は発生しない結果となり、この場合においてもレゾナンス状態であるといえる。安定解析における結果と実験によって得られた結果を比較すると、通水初期における蛇行波長が、実験によって得られた蛇行流路の波

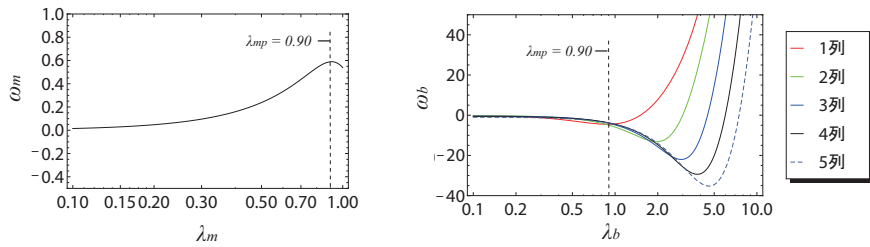


図-9 Case1 通水初期における波長と時間増幅率の関係

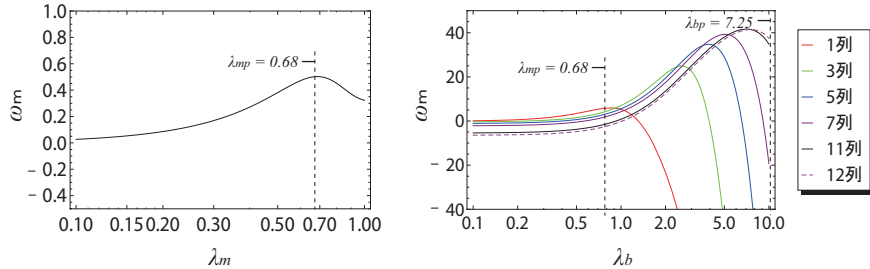


図-10 Case1 通水後期における波長と時間増幅率の関係

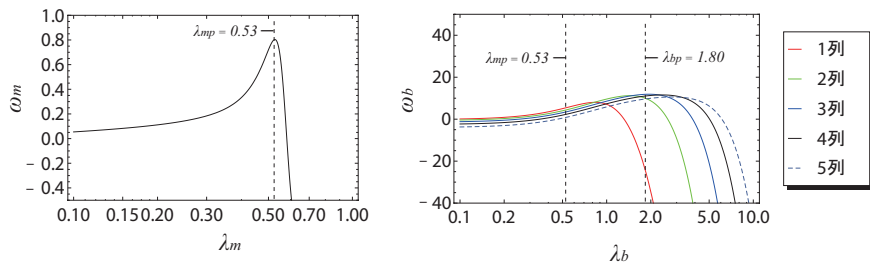


図-11 Case1 基本川幅における波長と時間増幅率の関係

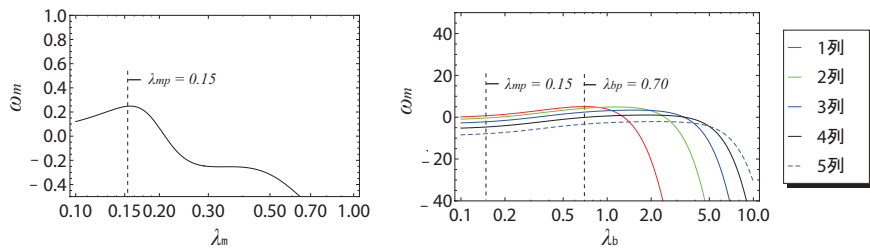


図-12 Case1 平均流路幅における波長と時間増幅率の関係

長に近い値となり、測定された蛇行流路の平均流路幅を用いた場合はやや短いことが分かる。このことは、今回の実験で形成された蛇行流路が通水初期の蛇行発達による影響を受け、その後に浮州等による流路の分岐が生じ、流れが集中することにより明確になった流路での蛇行発達が通水初期における蛇行発達とほぼ同じ波長であったため、そのままの波長で蛇行流路が発達したのとも考えることが可能である。

b) Case2

図-13 より、Case2 通水初期における L_{mp} は 3.14m ($\lambda_{mp}=1.60$)、 L_{bp} は 0.95m ($\lambda_{bp}=5.30$, 8 列砂州) となり、 λ_b を 1.60 とした場合の河床波は 3 列砂州となる。図-14 より、Case2 通水後期における L_{mp} は 5.59m ($\lambda_{mp}=0.90$)、 L_{bp} は 1.93m ($\lambda_{bp}=2.60$, 4 列砂州) となり、 λ_b を 0.90 とした場合の河床波は 2 列砂州となる。実験において、Case2 では Case1 のような蛇行形状の流路は形成されず、最終的に波長 4m 程度の 2 列砂州

が形成されている。多列砂州は、時間経過とともに砂州の列数が減少していくことが知られており、Case2 の現象も、多列砂州の時間的な列数の減少ととらえることができる。一方で、蛇行および砂州の発達に関する安定解析の結果と実験によって得られた多列砂州の列数や波長を比較すると、砂州の安定解析の結果における増幅率が卓越した砂州の列数ではなく、蛇行発達に伴う平面不安定での卓越波数によって規定された波長での砂州の列数が、実験結果とほぼ一致する結果となっている。このように Case2 においても、流路の蛇行は生じていないものの、Case1 と同様に初期及び通水後の蛇行発達における平面不安定性が影響を及ぼしている可能性が示唆される。

(4) まとめ

総合的に判断すると、実験において生じた現象が異なる両ケースともに、形成された河床形状は平面不

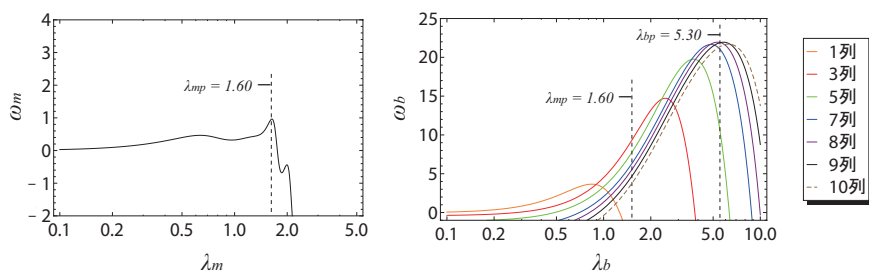


図-13 Case2 通水初期における波長と時間増幅率の関係

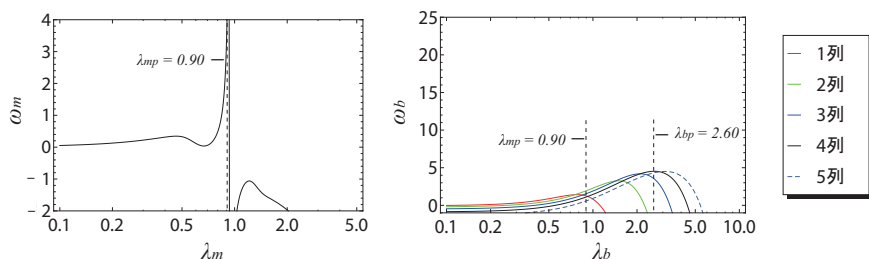


図-14 Case2 通水後期における波長と時間増幅率の関係

安定に起因する蛇行の影響を受けている可能性が高いと判断される結果となった。これらの結果は、先に述べたように線形理論との比較であり、今後は、砂州と平面不安定の両者による非線形性を考慮した検討が必要となる。

4. おわりに

本研究では、水路側壁による横断方向への拘束ができる限り小さい場合における、流路網形成ならびに蛇行流路と水理量との因果関係について明らかにすることを目的として、水理実験を行なった。実験の結果、Case1においては、時間経過とともに一波長がおよそ6mの比較的明瞭な蛇行流路が形成された。また、実験で得られた流路数と理論によって得られた流路数とがほぼ一致する結果を得た。Case2においては、多列砂州が形成され、時間経過とともに砂州の列数が減少していく現象を確認した。また、安定解析の結果において特異点が存在しないため、Case1とは異なる現象が生じたものと考えられる。蛇行及び砂州の発達に関する安定解析による結果と実験によって得られた河床形状との比較では、Case1, Case2ともに通水初期及び通水後期の蛇行発達に伴う平面不安定性の影響を強く受けている可能性が高いという結果が得られた。

今後の課題として、本研究では2ケースのみの実験による考察であるため、様々なケースの実験を重ね、流路網並びに蛇行流路と水理量、さらには平面不安定や砂州の形成との因果関係について検討していく必要がある。

究(B)(代表：泉典洋、課題番号：23360209)の助成を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 木下良作:石狩川可動変遷調査, 科学技術庁資源局資料, 第36号,1961.
- 2) 池田駿介, G. Parker, 澤井健二:河川の蛇行に関する統一見解, 第24回水理講演会論文集,pp.339-349,1980.
- 3) 長谷川和義, 伊藤仁:蛇行流路の経年変動に関する電算機シミュレーション, 土木学会北海道支部論文報告集第34号,pp.197-202,1978.
- 4) 藤田裕一郎, 赤松英樹, 村本嘉雄:網状流路の形成過程, 水理講演会論文集第31巻,pp.695-700,1987.
- 5) 芦田和男, 江頭進治, 里深好文:網状流路における流砂量, 水工学論文集第35巻,pp.391-396,1991.
- 6) 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, 水工学論文集第46巻,pp.737-742,2002.
- 7) 関根正人:斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション, 水工学論文集第47巻,pp.637-642,2003.
- 8) 伊賀久晃, 長谷川和義, 新庄興:公開河床変動解析ソフトによる河床地形の再現と線形理論指標による形成要因解析, 土木学会論文集 B1,Vol.4,I 967-I 972,2012.
- 9) Blondeaux,P. Seminara,G.A unified bar-bend theory ofriver meanders.J.Fluid Mech.157,449-470,1985.
- 10) 島絵梨子, 渡邊康玄:幅広水路を用いた流路網形成実験, 応用力学論文集 Vol.15,pp.I 583-I 590,2012 .
- 11) 藤田裕一郎, 赤松英樹, 村本嘉雄:複列砂州と網状流路の形成過程に関する実験, 京都大学防災研究所年報 第29号 B-2,pp.451-472,1986 .
- 12) 長谷川和義:沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学博士論文,1984 .
- 13) 渡邊康玄, 早川博, 清治真人:安定解析に基づく川幅の自立形成機構, 水工学論文集, 第53巻,2009 .

(2012.9.30 受付)

謝辞：本研究の遂行にあたり、科学研究費補助金基礎研