

II-24

共振深掘れの発生条件に関する移動床蛇行水路実験

北海道開発局開発土木研究所 正員 烏谷部寿人・渡邊 康玄・清水 康行

北海道大学工学部 正員 長谷川和義

北海道大学工学部 学生員 中村 健作

1. はじめに

河川の河床形状は主に、河川の平面形状と河床に発生する中規模河床形態によって決定される。河道の平面形状と中規模河床形態との相互関係に関しては最近の理論的研究^{1,2)}および数値シミュレーションを用いた研究³⁾により、共鳴現象の存在が指摘されている。しかし、現在までにこの共鳴現象を系統的に扱った実験は行われておらず、その現象について不明な事項が多く存在している。共鳴現象により、河床の洗掘は通常考えられるより大きく進行する場合もあり、河川においてどのような条件で共鳴現象が発生するかを知る事は、河川構造物の根入れ深さの決定等について治水上極めて重要な事項である。

本研究は、河川の平面形状と河床形態の共鳴現象を明らかにするための移動床水理模型実験を実施し、どのような水理条件においてどの程度の共鳴現象が発生するのかを明らかにするとともに、既往の理論的研究結果の適用性を把握し、さらにこの結果得られる情報を護岸や根固め工の設計のために応用可能な図表に整理することを目的としている。

2. 実験の概要

2-1 実験の目的

河床の形状は大きく分けて河道の湾曲と砂州の発生によって決められる。砂州の発生、非発生およびその領域区分(単列、複列など)については黒木・岸らの研究⁴⁾等数多くの領域区分図が提案され、それぞれ多くの実験データや実河川データとの適合性が確かめられている。また、木下・三輪の研究⁵⁾によると砂州の移動は蛇行角に支配され、蛇行角がある限界に達すると砂州の移動は止まることが報告されている。しかしながら、砂州の移動限界と蛇行角以外の蛇行波長や川幅水深比、川幅曲率半径比など他の条件との関係は明らかにされておらず、また蛇行水路内の砂州の定量的な形状や移動特性を系統的に調べた例は無い。

本研究の最終目的は、直線・蛇行河道において砂州の発生・非発生、砂州の移動・停止など様々な条件における河床形状の定量的な把握を行うことであり、一連の実験を通じて上記諸条件の相互作用を検討することである。

2-2 実験条件の設定

本研究において、考慮すべき条件は、河道の形状と砂州の存在である。

実験水路の平面形状は、Langbein-Leopold⁶⁾によって概ね実河川の平面形状を表すとされている Sine-generated Curve の式(1)を用いる。ここで、 θ : 水路蛇行角、 θ_0 : 水路の最大蛇行角、 $\tilde{L}$: 水路の蛇行波長、 $\tilde{S}$: 水路中心線に沿った距離である。

$$\theta = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\tilde{L}}\tilde{S}\right) \quad (1)$$

式(1)を $d\tilde{S} = \tilde{r}d\theta$ の関係式を用いて整理すると $(1/\tilde{r}) = (d\theta/d\tilde{S})$ となり、右边が式(1)の微分量を表す式となる。ここで、 $\tilde{r}$: 水路の曲率半径である。

$$\frac{1}{\tilde{r}} = \frac{2\pi}{\tilde{L}}\theta_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\tilde{L}}\tilde{S}\right) \quad (2)$$

最小曲率半径 $\tilde{r}_0$ を用いて θ_0 について解くと $\theta_0 = (\tilde{L}/2\pi)(1/\tilde{r}_0)$ となり、分子分母に $1/2$ 水路幅 $\tilde{B}$ を掛けると $\theta_0 = (\tilde{B}/\tilde{r}_0)(\tilde{L}/\tilde{B})(1/2\pi)$ という関係式が得られる。右边をそれぞれ $(\tilde{B}/\tilde{r}_0) = \nu$ 、 $(\tilde{L}/\tilde{B})(1/2\pi) = 1/\lambda$ と定義する。すなわち、河道の平面形状を表す $\tilde{L}$ と θ_0 は無次元パラメータ λ, ν によって表すことができる。 λ は無次元蛇行波数、 ν を川幅曲率半径比と呼ぶこととする。

砂州の発生に関しては、従来の理論的研究等から河幅水深比 $\beta(= \tilde{B}/\tilde{D}_0)$ が支配パラメータであると言われている。ここで、 $\tilde{D}_0$: 平均水深である。

以上より、本研究では λ, ν, β の3つのパラメータに着目し、実験を行うこととした。典型的な交互砂州形状を得るため、黒木・岸⁴⁾、木下・三輪⁵⁾による領域区分図を参考に水理条件を定め、上記のパラメータの値を決定することとした。図-1.2は、

Hydraulic Model Experiments with Movable Bed in Meandering Water Channel
by Toshihito TOYABE, Yasuharu WATANABE, Yasuyuki SHIMIZU, Kazuyosi HASEGAWA and Kensaku NAKAMURA

それぞれの領域区分図に今回の実験条件をプロットしたものである。case*-1 は非砂州実験、case*-2,3,4 は砂州実験を想定している。また、case1-*および case11-*は、砂州が移動すると想定される水路形状、case5-*,case7-*,case9-*は、砂州が移動しないと想定される水路形状である。

なお、実験スケールとして水深が河床材料の粒径に比べて小さいため、中規模河床形態と小規模河床形態とが混在する事は望ましくない。本研究においては小規模河床形態の発生しづらい条件の中で実験を行う必要がある。小規模河床形態の領域区分については従来より実測値に基づいた領域区分図が提案されており、本研究では一般的な芦田・道上ら⁷⁾の $\tau_* \sim \bar{D}_0/\bar{d}_s$ で表される区分図を用いるとともに、掃流力 τ_* が限界掃流力 $\tau_{*c} = 0.05$ より大きくなるように条件を設定することとした。図-3 は、今回の実験条件をプロットしたものであり、全ケースとも砂澱、砂堆が発生する Lower regime には入っていない。また、一般に河川では常流の流れであることからフルード数が1未満となるように配慮することとした。さらに、道内主要河川における川幅水深比 β は概ね5~40の間にあり、本研究の結果と道内主要河川の洗掘状況との比較を行うため、この範囲に β が納まるように考慮している。これらの諸条件の範囲にあり、かつ河床材料に対し粘性の影響を受けない様十分な水深がとれるように式(3)の抵抗則を用いて水深を定めることとした。ここで、 $\bar{u}_*$: 摩擦速度、 $\bar{u}$: 平均流速である。

$$\frac{\bar{u}_*^2}{\bar{u}^2} = \frac{1}{\{6 + 2.5 \ln(\frac{\bar{D}_0}{2.5d_s})\}^2} \quad (3)$$

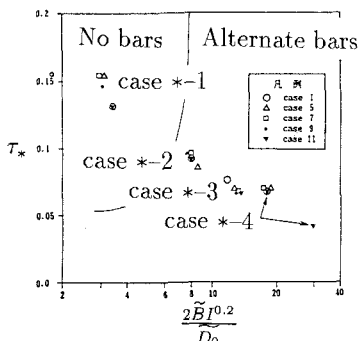


図-1 黒木・岸の領域区分による
本研究の実験条件

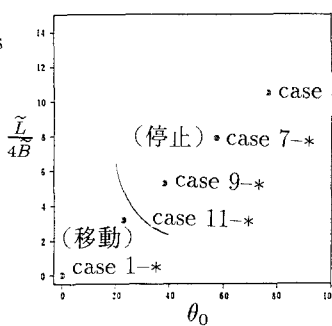


図-2 木下・三輪の領域区分による
本研究の実験条件

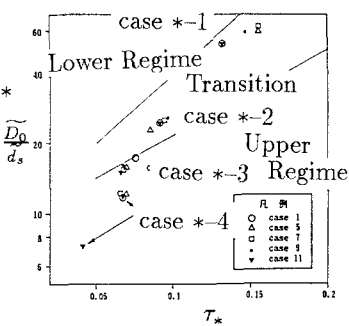


図-3 芦田・道上の領域区分による
本研究の実験条件

以上の条件を満たし、振幅が実験架台に納まるように水路形状および水理量を与えた。すなわち、直線水路および λ の異なる蛇行水路4本を用い、それぞれ β について4ケース、合計20ケースの実験を行った。なお、本報告では $\nu = 0.10$ のみについて報告する。実験に用いた諸元をまとめて表-1に示した。なお用いた河床材料は、粒砂5号である。本来、河床材料粒径についてもその影響を考慮する必要があるが、本研究において無次元粒径 $d_s = \bar{d}_s/\bar{D}_0$ が各ケースでオーダー的にそれほど差が無いことから、河床材料の粒径の現象に対する影響は無視することが可能であり、本研究では考慮していない。

表-1 実験の諸元

case	蛇行段長 $\bar{L}(cm)$	流量 $\bar{Q}(l/s)$	測定 水路勾配	平均水深 $\bar{D}_0(cm)$	河床材料 $\bar{d}_s(mm)$	蛇行角 θ_0	λ	ν	β	d_s	τ_0	η
case01-1	—	3.97	1/243	2.96	0.553	—	—	—	5.1	0.019	0.134	0.255
case01-2	—	1.46	1/161	1.36	0.553	—	—	—	11.0	0.041	0.093	1.458
case01-3	—	0.79	1/138	0.96	0.553	—	—	—	15.7	0.058	0.077	2.477
case01-4	—	0.56	1/106	0.65	0.553	—	—	—	23.1	0.085	0.068	3.623
case05-1	628.00	3.99	1/241	3.33	0.568	38.217	0.15	0.10	4.5	0.017	0.151	1.508
case05-2	628.00	1.47	1/161	1.27	0.568	38.217	0.15	0.10	11.8	0.044	0.087	2.898
case05-3	628.00	0.81	1/138	0.87	0.568	38.217	0.15	0.10	17.3	0.064	0.069	3.958
case05-4	628.00	0.55	1/106	0.65	0.568	38.217	0.15	0.10	23.0	0.085	0.068	3.266
case07-1	471.00	4.01	1/244	3.35	0.568	28.662	0.20	0.10	4.5	0.016	0.151	1.595
case07-2	471.00	1.60	1/160	1.37	0.568	28.662	0.20	0.10	10.9	0.040	0.094	2.585
case07-3	471.00	0.80	1/138	0.85	0.568	28.662	0.20	0.10	17.7	0.065	0.068	3.979
case07-4	471.00	0.56	1/106	0.65	0.568	28.662	0.20	0.10	22.9	0.083	0.068	4.008
case09-1	314.00	4.02	1/243	3.29	0.568	19.108	0.30	0.10	4.5	0.017	0.149	1.406
case09-2	314.00	1.50	1/161	1.41	0.568	19.108	0.30	0.10	10.7	0.039	0.096	2.339
case09-3	314.00	0.80	1/138	0.86	0.568	19.108	0.30	0.10	17.5	0.064	0.069	3.749
case09-4	314.00	0.55	1/106	0.66	0.568	19.108	0.30	0.10	22.9	0.084	0.068	3.879
case11-1	188.40	4.01	1/243	2.96	0.568	11.465	0.50	0.10	5.1	0.019	0.134	0.890
case11-2	188.40	1.51	1/161	1.36	0.568	11.465	0.50	0.10	11.0	0.041	0.093	2.230
case11-3	188.40	0.81	1/138	0.83	0.568	11.465	0.50	0.10	18.1	0.067	0.066	2.863
case11-4	188.40	0.55	1/106	0.40	0.568	11.465	0.50	0.10	37.3	0.138	0.042	6.891

2-2 実験装置

実験装置の模式図を図-4に示す。実験架台の長は25m、幅は3mである。ここに水路幅0.3mの蛇行水路及び直線水路を設置し、設定した勾配になるよう砂を敷きならした。この蛇行水路は、実験架台にラワン合板（完全耐水、厚さ24mm）を水路平面形状に切断したものを設置し、塩ビ板（無色透明、厚さ5mm）を用いて深さ30cmの側壁を水路底板形状に合わせ固定したものである。また、砂の荷重によって側壁が変形しないように抑えを施した。さらに、停水後排水時に河床形状が崩れることを防ぎ、かつすみやかに排水ができるよう直径2cmの塩ビパイプを砂の中に埋めた。

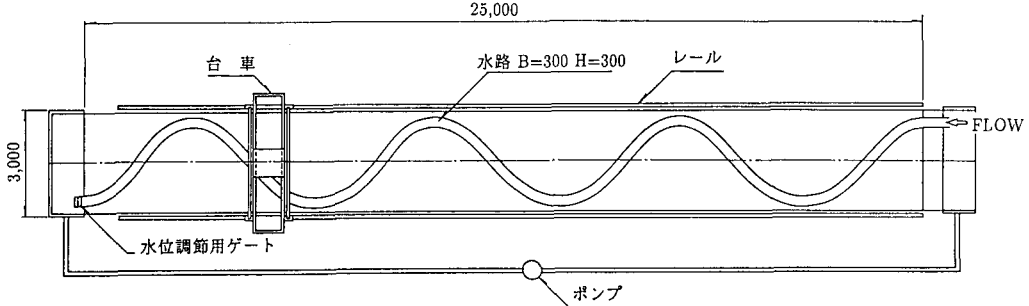


図-4 実験装置の模式図

実験を開始する際、河床が急激に変化しないように一旦湛水させ、その後水位と流量を設定値に調節した。通水後河床が定常に達したと判断されたとき、すみやかに水位の測定を行った。その後河床が変化しないように排水を行い、水が完全に排除された後に河床高の測定を行った。なお測定は非接触式的光センサーを用いた自動河床読み取り装置を用いて行った。

2-3. 実験結果

各蛇行実験の最深河床の縦断変化を示したものが図-5である。なお、縦軸は、平均河床からの堆積量（洗掘された場合符号は負となる）を平均水深で無次元化した値であり、横軸は、流下距離を水路1/2蛇行波長で無次元化した値である（原点は、水路の蛇行の曲頂部とした）。また、各断面の平均河床高についても併記した。非砂州実験であるcase*-1は、水路の曲頂部で洗掘が大きく、変曲部で洗掘が小さい傾向を示し、河床形状が水路の平面形状に依存していることが読み取れる。また、砂州実験においても、砂州が固定しかつ砂州波長と水路の蛇行波長がほぼ等しくなったcase9-2,3,4およびcase7-2,3においても水路の蛇行形状に大きく依存していることがわかる。一方、砂州波長と水路の蛇行波長が異なる結果となったcase11-2,3,4、case7-4およびcase5-2,3,4については水路曲頂部において洗掘が大きくなる傾向があるものの水路の蛇行形状とは関係なく洗掘が生じていることが確認された。また、case5-2,3,4については、図-3において砂州が固定すると判断された実験条件であるが、砂州の移動が確認されており砂州の移動が蛇行角のみで決定されず蛇行波長にも依存するとした清水らの研究結果³⁾を裏付ける結果となった。

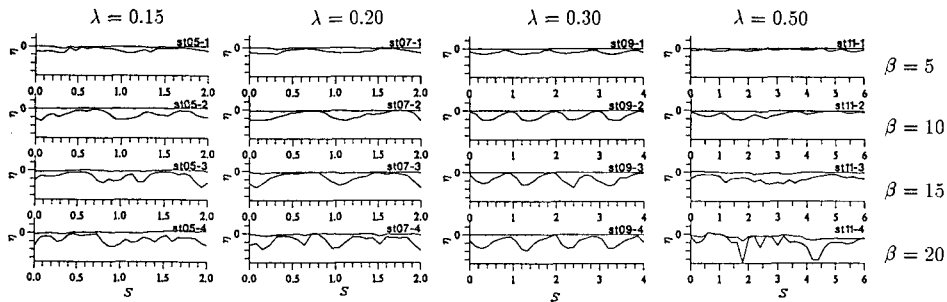


図-5 各実験の最深河床高縦断変化

以下に特徴的な実験ケースについて河床コンター図を示し、実験結果の概要を述べる。

図-6は、今回最も蛇行波長の短いcase11の非砂州実験（case11-1）および砂州実験（case11-2）の河床コンター図である。非砂州実験であるcase11-1は、流れが直線的に流れ、凹岸部で堆積、凸岸部で浸食が発生し、無次元最大洗掘深は0.89と水深

程度となっている。一方、同一蛇行形状の砂州実験である case 11-2 は、砂州の発生により流れが蛇行するとともに砂州前縁に最深河床位置が発生しており、砂州波長と蛇行波長が異なっていることから平面形状に関係なく洗堀・堆積部が生じている。この様に、蛇行長が短く、砂州の発生しない場合、一般に考えられる洗堀堆積位置と異なっている。

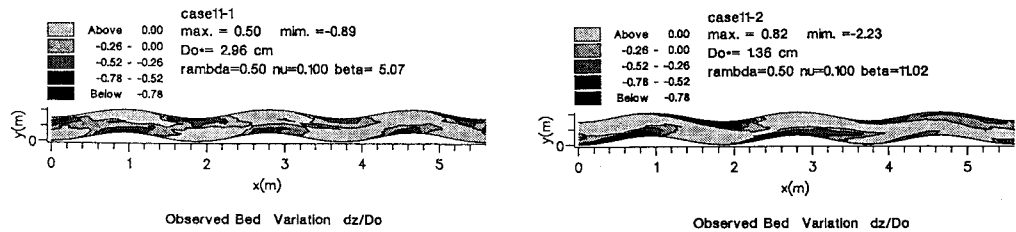


図-6 case11-1 および case11-2 の河床コンター図

蛇行波長と砂州波長の等しい case9 について非砂州実験 (case9-1) と砂州実験 (case9-4) の河床コンターを示したものが、図-7 である。両ケースとも同様の河床形状を示している。しかし、無次元最大洗堀深は、非砂州実験で水深の 1.4 倍程度であるが、砂州実験である case9-4 では水深の 4 倍程度にまでなっている。砂州と蛇行形状の波長が等しくなる場合、極めて大きな洗堀となることが把握された。

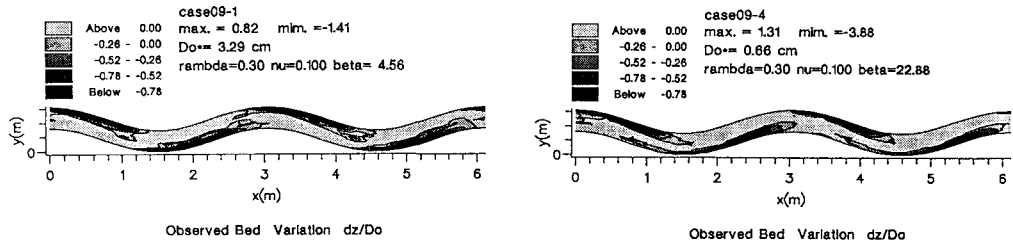


図-7 case9-1 および case9-4 の河床コンター図

図-8 は、同一の砂州発生パラメータ β で無次元蛇行波数 λ の異なる実験の比較を行ったものである。すなわち、蛇行波長の短い case7-3 および蛇行波長の長い case5-3 のコンター図である。case7-3 は、水路一蛇行に一对移動しない砂州が発生した実験である。一方、case5-3 は、蛇行変曲点を挟む区間において砂州の移動が見られた。すなわち、変曲点近傍から流下した砂州は曲頂上流で消滅し、上流側から新たな砂州が流下してくるといった挙動を繰り返した実験である。また、このケースは蛇行一波長に二対の交互砂州が発生し、蛇行波長と砂州波長が異なった実験である。両ケースとも図-2 では砂州が移動しないと判断された実験であるが、蛇行波長の長い case5-3 において砂州の移動が確認されたことから、砂州の移動に関しては、水路の蛇行角以外に砂州波長と蛇行波長の関係についても考慮する必要があることが確認された。

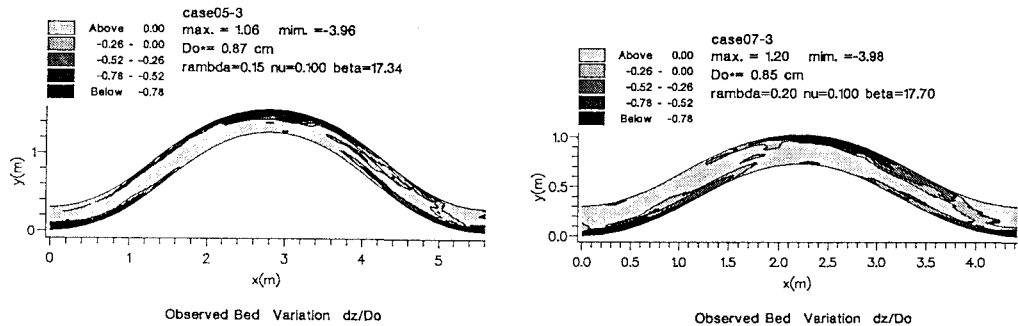


図-8 case5-3 および case7-3 の河床コンター図

3. 河床洗堀の規模とその位置

護岸計画を立案する場合、河床洗堀がどの位置にどの程度発生するかを知り、被災しない根入れの深さを把握するとともに、近年叫ばれている生態系保全あるいは親水性の面からも、最も効果的な配置計画とする必要がある。とる必要がある。ここでは、砂州と河道の蛇行が共存する場合に、最大の河床洗堀がどの位置にどの程度発生するかを把握することに目的を絞り検討を行った。

3-1 河床洗堀の規模

無次元河床洗堀深 η の最大値が河幅水深比 β でどのように変化するかを、無次元蛇行波数 λ をパラメータにとり示したものが図-9である。全ての λ について、 β の増加とともに η が増加しており、河床洗堀深も砂州発生に支配パラメータである β に大きく依存していることがわかる。また、図-9の値を基に内挿して、 β をパラメータにとり無次元河床洗堀深 η の最大値が水路蛇行形状を表す無次元蛇行波数 λ によってどのように変化するかを示したものが、図-10である。どの β についても λ が0.15~0.30の範囲で最大値を示す曲線で表され、 β が大きくなるほど洗堀深が大きい方に曲線が平行移動した結果となった。 λ が0.15~0.30の範囲の実験は、砂州波長と水路蛇行長が一致した実験であり、砂州と水路の平面形状の共鳴すると考えられる条件である。すなわち、砂州と水路の平面形状の共鳴する領域で最大洗堀深が大きくなるという従来の研究^{1),2),3)}を裏付ける結果となった。

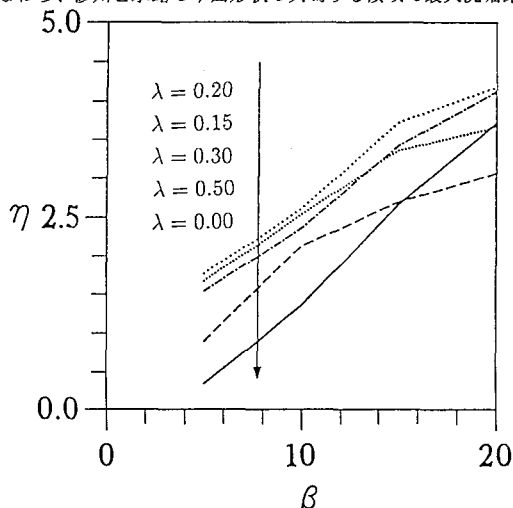


図-9 最大無次元河床洗堀深と β との関係

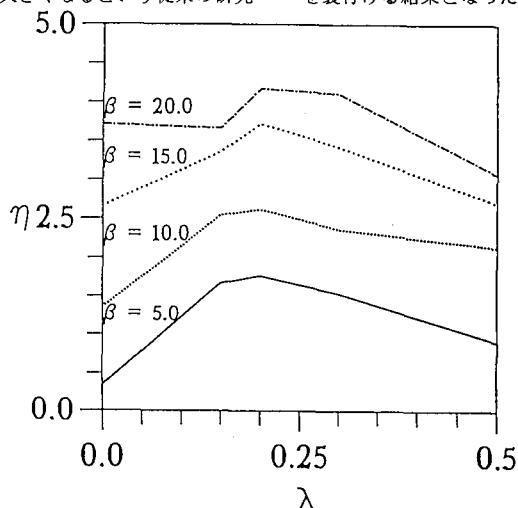


図-10 最大無次元河床洗堀深と λ との関係

3-2 最大洗堀深の発生位置

各実験ケースにおいて、縦軸に通水時間(分)、横軸に最深河床の無次元位相差 δ (水路の蛇行曲頂凹岸部から最深河床高生起位置までの距離を1/2蛇行波長で無次元化した値であり、上流方向を正の値としている)とり、最大洗堀深が時間の経過とともに各蛇行1波長のどの位置に発生したかをみたものが図-11である。最大洗堀深生起位置が、水路曲頂凹岸部の時無次元位相差が0であり、凸岸部の時無次元位相差が ± 1 である。砂州が固定したcase9-2,3,4およびcase7-2,3,4については、各蛇行1波長の最深河床部が一定の位相を持って発生している。一方、非砂州実験であるcase5-1、case7-1、case9-1、case11-1および砂州の移動が確認されたcase11-2,3,4の各実験ケースについては、最深河床発生位置が固定されず、水路の全ての位置で最深河床が発生することを示している。なお、同様に砂州の移動が確認されたcase5-2,3,4については、水路の蛇行曲頂近傍の洗堀が大きく、砂州の移動による洗堀箇所の移動がこの図には現れてこなかった。これは、同じ無次元蛇行波数の非砂州実験であるcase5-1が、他の非砂州実験で最深河床生起位置がばらついているのに比較し、一定の位置に最深河床が生起していることから、水路平面形状の河床に与える影響が強いと判断されることから、砂州の影響に比較し、水路の蛇行による影響が強いためであると考えられる。以上の結果のみからは結論付けられないが、同じ河幅曲率半径比の場合、無次元蛇行波数の増加とともに、河床形状に与える影響は水路蛇行形状の影響から砂州の影響が支配的になっていくとも考えられ、今後この点についても検討を進める必要があると思われる。

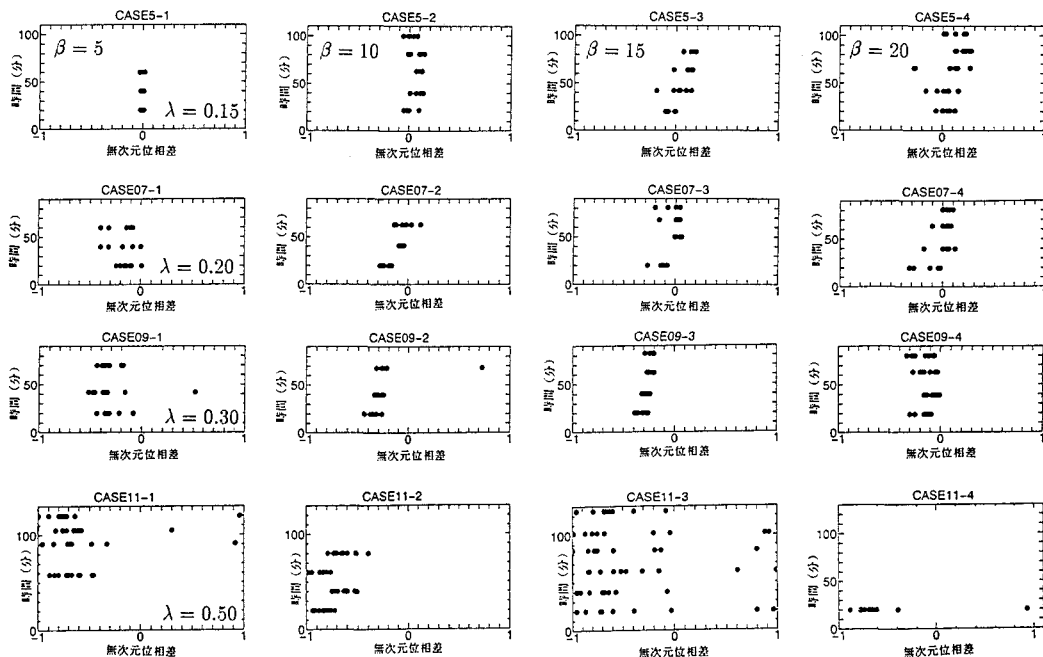


図-11 無次元位相差の時間的变化

4. おわりに

砂州と水路蛇行形状の共鳴に関する系統的な実験を行った結果、以下の事項が明らかになった。

- 1) 砂州の移動・停止に関して、水路蛇行角のみでは決定されず、砂州波長と蛇行波長との関係についても考慮する必要がある。
- 2) 砂州と水路の蛇行が共存する場合、極めて大きな洗堀を受けることが確認された。
- 3) 無次元最大洗堀深は、河幅水深比 β の増加とともに大きくなる傾向を示し、ある特定の無次元蛇行波数 λ において最大値を示す。
- 4) 同じ河幅曲率半径比の場合、無次元蛇行波数の増加とともに、河床形状に与える影響は水路蛇行形状の影響から砂州の影響が支配的になっていくと考えられる。

今後の課題としては、河床洗堀が最も大きくなると考えられる共鳴現象が生起する条件について、この近傍の水理条件の実験を追加し、より詳しく発生の形態について解明していく必要がある。また、今回考慮しなかった ν および d_s の異なるケースについても実験を行い、これらによる特性も調べる必要がある。

《参考文献》

- 1) Blondeaux, P. and G. Seminara; A unified bar-bend theory of river meanders, J. Fluid Mech., 157, 1985.
- 2) Parker, G. and H. Johannesson; Observation on several recent theories of resonance and overdeepening, River Meandering, AGU Monograph No. 12, 1989.
- 3) 清水康行、Marco Tubino、渡邊康玄; 自由砂州と固定砂州の共鳴条件における河床変動計算、水工学論文集第 36 巻、1992.
- 4) 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、第 342 号、1984.
- 5) 木下良作、三輪式; 砂礫堆が安定する河道の平面形状、土木学会第 29 回年次学術講演会、1974.
- 6) Leopold, L. B. and M. G. Wolman; River channel patterns, Braided, Meandering and Straight, Geological Survey Professional Paper, 282-B, 1957.
- 7) 芦田和夫、道上正規; 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第 206 号、1972.