

非定常流れにおける河床形状の変化過程に関する研究
Transformation Processes of Bed Forms under Unsteady Flow

東京工業大学 正員 福岡 捷 二
東京工業大学 学生員 〇五十嵐 崇 博
東京工業大学 学生員 久 米 正 浩

1. まえがき

自然河川の河床には異なる形状・移動特性をもつ河床波や砂州が存在する。洪水時には掃流力が時間的に変化するため洪水期間中には河床の形状変化や河床形態の遷移がしばしばおこる。河床形態の遷移は流れの抵抗の変化を引き起こすため、洪水期間中の河床形態の変化特性を明らかにすることは河道計画に重要である。^{1) 2) 3)}

一定流量のもとでは河床形状が安定形状に達しているか発達段階にあるかは図-1に示すように通水時間と河床形状が発達するのに要する時間の大小関係より決まる。一方、流量が時間的に変化するときには河床形状は図-2に示すように流量および流量の変化率から決まる継続時間と河床形状の発達に要する時間の大小関係により決まる。この場合発達に要する時間も $q(t)$, $\frac{dq(t)}{dt}$ に強く依存する。このため非定常流れにおける河床形状の変化過程は非常に複雑となり、河床形状の発達時間、流量および流量の時間変化率からきまる継続時間と河床形状の間の関係を明確にする必要がある。^{4) 5)}

河床波の領域ではすでに芦田⁴⁾らおよび澤井⁵⁾が流量を時間的に変化させた場合の河床波の変形過程と流量変化に対する河床波の応答遅れを明らかにしている。また中川・辻本⁶⁾は河床形状の応答遅れを流砂の遅れ距離と対照して論じることにより、応答遅れの機構を論じている。

著者らは⁷⁾非定常流れにおける砂州の変形機構を調べるための第一段階として、流れに適合しない一連の砂州上に一定流量を通水し、これらの砂州がどのように変形するか、特に砂州の消滅・合体・分裂の機構について実験的に検討してきた。本研究ではこの研究をさらに進め、(1) 非定常流れが砂州を変形させる機構はどのようなものか；(2) 非定常流れが河床形態の遷移にどのような影響を及ぼすか；(3) 最後に混合砂れきからなる河床上に非定常流が生じるとき形成される単列砂州の形状・移動および抵抗特性を明らかにするための基礎として、一定流量が混合砂れき河床上に生じるとき、形成される砂州の形状特性はどのようなものかを調べる。

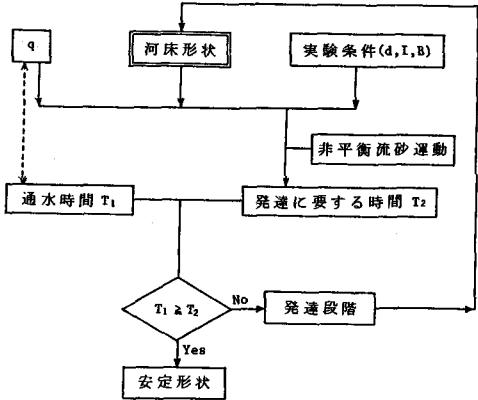


図-1 一定流量下の河床形状の変形過程

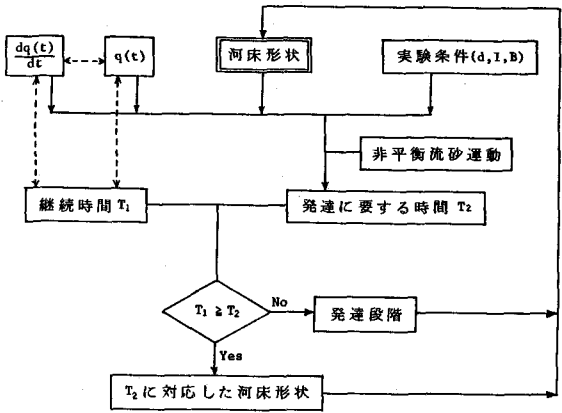


図-2 非定常流量下の河床形状の変形過程

2. 実験装置と実験方法

実験には水路幅 0.2 m, 長さ 12 m, 勾配 1/100 のアクリル製水路を用いた。使用砂は図-3 の粒度分布をもつ一様粒径砂 (A 砂, 平均粒径 $d_m=0.77\text{mm}$) および混合粒径砂 (B 砂, 平均粒径 $d_m=0.8\text{mm}$, 標準偏差 $\sigma_0=2.0$) の 2 種類である。流量と周期の制御はサーボモーターを連動したバルブの開閉により行ないその波形は正弦波形である。水路上流端では下流端での流出土砂量に等しい量を給砂する。混合砂を用いた実験ではふり分け現象により流出土砂の粒度分布は河床砂と異なるため, 流出土砂の粒度分布に等しい粒度分布の砂を給砂する (図3 C 砂)。河床横断面形状は自製の河床形状測定器を用いて止水後測定した。

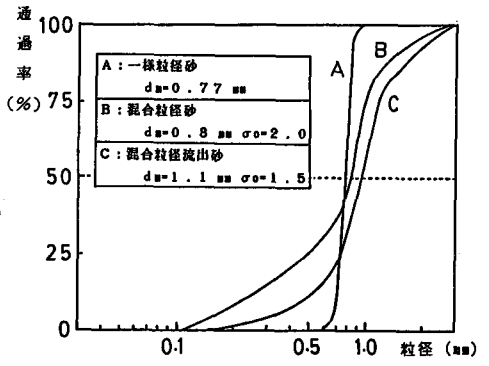


図-3 粒径加積曲線

3. 非定常流れにおける単列砂州の変形

非定常流れにおける河床形状は前述のとおり多くの要因によって影響されるため, 最初に他の条件は同一として, 一定流量における河床形状と比較しながら論じることが必要である。

表-1 は一定流量における実験結果を示したものである。この実験条件では $q=60\text{cm}^2/\text{s}$ を境として, 大きい流量側で流下反砂堆, 小さい流量側で単列砂州が形成される。

Run No.	1	2	3	4	5
流量 q [cm^2/s]	20	30	40	50	60
水深 h_0 [cm]	1.0	1.3	1.4	1.6	1.7
河床形態	砂移動なし	単列砂州			流下反砂堆
波高 H [mm]	—	16	17	17	—
波長 L [cm]	—	170	170	180	—

表-1 実験条件 (一様粒径砂 $d=0.77\text{mm}$)

用いた非定常流のハイドログラフは周期 $T=30\text{分}$ 最大流量 $q_{\text{max}}=50\text{cm}^2/\text{s}$ (Run 6) の特性をもちこの流量変化の範囲で形成される河床形状は単列砂州である。この条件は $\frac{dq}{dt}$ がかなり大きい流れに相当する。実験は平坦河床から始め, 3 周期終了後と 4 周期終了後の砂州形状が変化しないことを確かめた後, 5 周期目の砂州形状を 5 分ごとに測定する。図-4 は移動する 1 つの砂州の横断形状の時間変化を砂州先端から砂州半波長の 6 割上流位置での横断形状で代表させて示したものである。流量変化がかなり大きい流れであるにもかかわらず, 砂州形状は時間的にはほとんど変化せず, さらに定常流量での砂州形状とほぼ同一である。このことは 1 周期の間単列砂州が存在しつづける流れで, かつ砂州が十分に発達した上では, その上の流れは単列砂州の形状に支配され, 流量の変化は砂州の変形にそれほど影響を与えないためである。

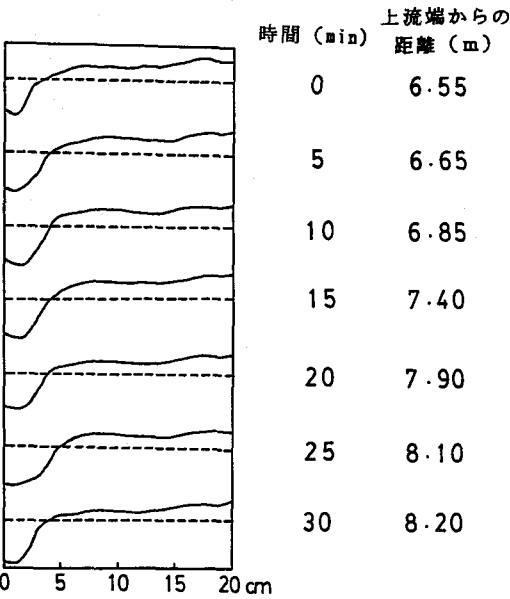


図-4 非定常流下 ($T=30\text{分}$, $q_{\text{max}}=50\text{cm}^2/\text{s}$) でおこる単列砂州の変形

4. 非定常流れにおける河床形態の遷移過程

河床形態の遷移過程に及ぼす流れの非定常性の影響を調べるため, 1 周期間に単列砂州と河床波が別個にまたは共存して形成される流量を与え, これらの河床形状の変化過程を調べる。図-5 は河床形態の遷移に及ぼす非定常性の影響をその時点に存在する河床形態により分類し示したものである。縦軸は単位幅流量 q ,

横軸は単位幅流量の変化率 $\frac{dq}{dt}$ である。 $\frac{dq}{dt} > 0$ は増水期、 $\frac{dq}{dt} < 0$ は減水期を示す。図中の“砂州形成可能領域”では、非定常流れは河床に対し砂州を形成するように作用し、流れの継続時間とそれに対する砂州形状の応答時間によって発達程度がきまり、“単列砂州が卓越する領域”内では単列砂州と流下反砂堆の共存した河床に対し流れが砂州を形成し流下反砂堆を消滅させるように作用する。“河床波形成可能領域”、“河床波が卓越する領域”についても河床に対する流れの作用は“砂州”を“河床波”と言いかえたもので定義される。

減水期の流れの非定常性の影響を明らかにするために図-6に示す2つの実験を行なった。Run 7は平坦河床から半周期 $T/2=20$ 分で流量を正弦波状にゼロまで減少させる。Run 8は $q=100\text{cm}^2/\text{s}$ で安定な流下反砂堆を形成させた後同様の流量ハイドログラフを与える。流量が $q=60\text{cm}^2/\text{s}$ まで減少するときには、両実験とも流下反砂堆と砂州が共存状態にある。図-6中に示すかまぼこ型形状は $q=60\text{cm}^2/\text{s}$ における砂州と流下反砂堆の共存状態の河床横断面形状から $q=60\text{cm}^2/\text{s}$ の一定流量で形成される流下反砂堆のみの横断面形状を差し引いたもので、この流量での砂州の一波長平均された形状とみなすことができる。この河床材料、水理条件のもとでは、一定流量 $q=60\text{cm}^2/\text{s}$ は流下反砂堆を発生させる。Run 7、Run 8の実験を比較すると、いずれも減水期

の $60\text{cm}^2/\text{s}$ で砂州が発生しており、その波高はRun 8の方が大きい。これは減水期には流砂が堆積傾向にあるうえに、河床に流下反砂堆が存在するときには(Run 8)その凹凸が砂州形成の引き金となるためである。このため、減水期の“砂州形成可能領域”は図中の境界線が示すように、そのときの河床が平坦河床(図-5(i))である場合より流下反砂堆(図-5(iv))が形成されている場合のほうが広がる。また砂州の横断勾配の存在も減水期の砂州形成を助長する

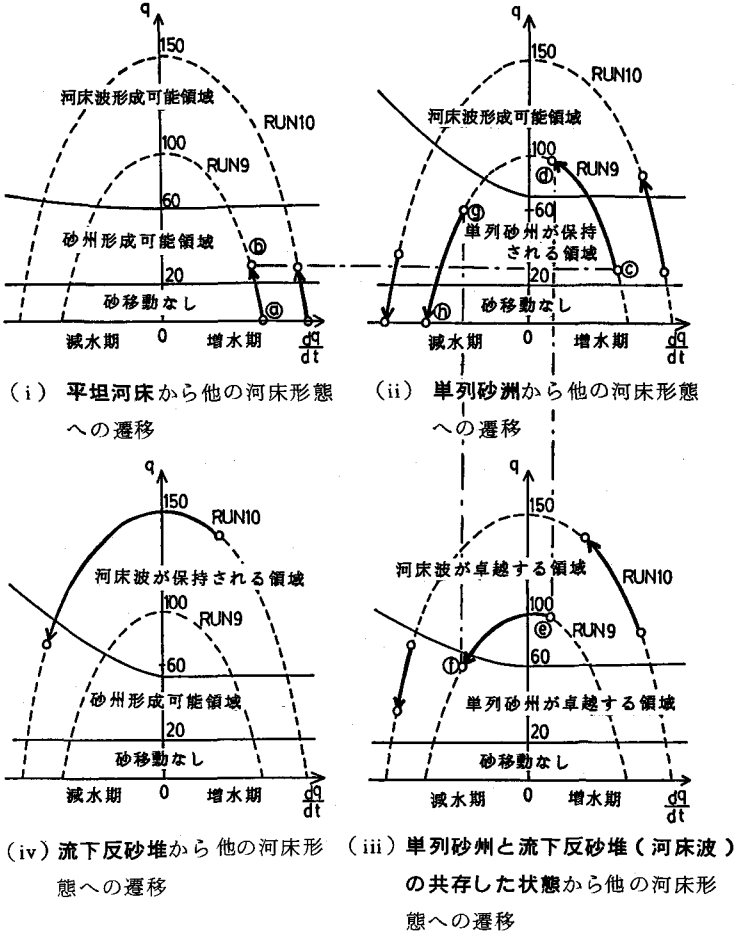


図-5 河床形態の遷移に及ぼす流れの非定常性の影響
及び、河床形態の遷移過程の例 (Run 9: $T=80$ 分, $q_{\max}=100\text{cm}^2/\text{s}$)
(Run 10: $T=80$ 分, $q_{\max}=150\text{cm}^2/\text{s}$)

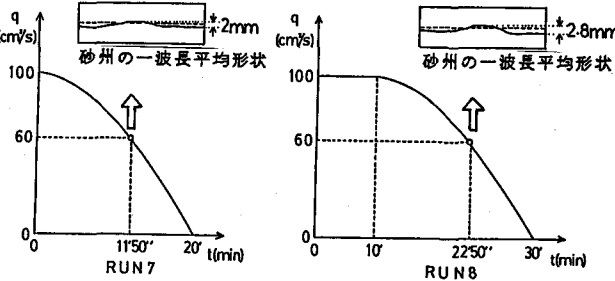


図-6 初期河床が異なる時の非定常流下の河床形状の変化

ため、図-5(ii)の“単列砂州が保持される領域”は大きく広がる。

つぎに2つの流量変化について、河床形態の遷移を $q \sim \frac{dq}{dt}$ 図上で検討する。Run 9は周期 $T = 80$ 分、最大流量 $q_{\max} = 100 \text{ cm}^2/\text{s}$ の流量ハイドログラフである。流量は正弦波状に変化するため、一周期間に図-5に示す楕円上を矢印の向きに動く。流れは平坦床から始まるため、図-5(i)の③点が初期状態となる。流れが④点に達した時、平坦河床に砂州が現われる。このときには $q \sim \frac{dq}{dt}$ の関係は図-5(ii)の③点に移動し、“単列砂州が保持される領域”内で砂州は徐々に波高を大きくする。やがて流れが“河床波形成可能領域”にはいり、④点において流下反砂堆が形成されると、河床形状は砂州と流下反砂堆の共存した形状となる。この時図-5(iii)の④点に移動し、“河床波が卓越する領域”内で砂州波高は徐々に小さくなる。しかし砂州が消滅する前に“単列砂州が卓越する領域”にはいり、この領域では流下反砂堆が波高を小さくしやがて④点において消滅する。この時河床には砂州形状のみが残り図-5(ii)の⑤点に移動する。“単列砂州が保持される領域”内で砂州は徐々に波高を大きくし、一周終了時点で河床には安定な単列砂州が形成される。図-5にはRun 10の周期 $T = 80$ 分、最大流量 $q_{\max} = 150 \text{ cm}^2/\text{s}$ でおこる河床形態の遷移過程も併記してある。Run 10はRun 9に比し流量が大きく図-5(iii)に示す“河床波が卓越する領域”内にさらされている時間も長いので、砂州が消滅し最大流量付近で流下反砂堆のみが河床に残る。

単列砂州と河床波の形成領域間で流量が変化するとき河床の変形に及ぼす流れの非定常性の影響を明確にするため、図-7、8に示す2つの実験を行なった。すなわちRun 11, Run 12では正弦波状流量ハイドログラフにおいて現われた砂州の領域と流下反砂堆の領域のそれぞれの流量の積分値がステップ状の流量変化に置き換えたものと等しくなるように流量変化を与える。図にはそれぞれ $t = 40$ 分での砂州の半波長平均形状および流下反砂堆形状を併記してある。図-7は正弦波もステップ波もほぼ同じ砂州形状特性を示しているが、

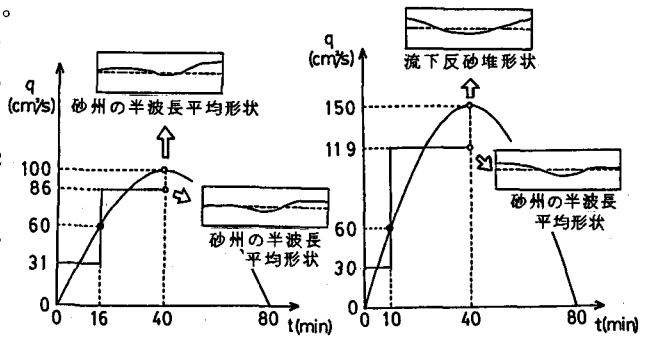


図-7 ハイドログラフが
Step関数で近似でき
る場合—Run 11

図-8 ハイドログラフが
Step関数で近似でき
ない場合—Run 12

図-8は明らかに河床形状が異なる。当然のことながら河床の変形からみて正弦波状ハイドログラフをステップ状ハイドログラフで近似できるのは流れの非定常性が小さい図-7の場合であることがわかる。

5. 混合砂れき河床の交互砂州

河川の河床材料は大小様々の粒径から構成されている。そのため流れによって粒度のふるい分け現象がおこり、河床形状は均一砂れき床の場合とは異なった特性を示す。特に単列砂州が構成されるような流れでは、掃流力は限界掃流力に近い。このため、河床が混合粒径砂から構成されるとき、粒径ごとに移動限界が

Run No.	13	14	15	16	17	18		19	20
流量 $q(\text{cm}^2/\text{s})$	20	30	40	50	60	70	～	130	140
水深 $h(\text{cm})$	1.0	1.3	1.4	1.6	1.7	1.9	—	2.8	2.9
河床形態	砂移動なし	単列砂州							流下反砂堆
波高 $H(\text{mm})$	—	15	17	17	5	5	—	5	—
波長 $L(\text{cm})$	—	210	230	220	110	110	—	110	—

表-2 実験条件 (混合粒径砂 $d_m = 0.8 \text{ mm}$, $\sigma_0 = 2.0$)

異なり、粒度のふり分けが著しくなる。このことは混合砂れき床での砂州の形状、移動に影響を与え、その結果流れの抵抗にも影響する。ふり分け現象の影響は流れが非定常となるとさらに著しくなると考えられる。

ここでは非定常流における単列砂州の研究に先だち、定常流での混合粒径砂の単列砂州について調べる。

混合砂れき床上の単列砂州の実験結果を表-2に示す。

また混合砂れき河床における単列砂州の平面形を写真-1, 2, 3に示す。表-1に示す

写真-1 均一砂れき床で形成される平衡状態の単列砂州の横断面形状
均一砂れき河床の単列砂州と混合砂れきから構成される単列砂州の比較から次の点が明らかとなる。

①混合砂れき床では均一砂れき床で形成されなかった水理条件でも単列砂州が形成され、砂州の形成範囲は広がっている。しかし、 $60\text{ cm}^2/\text{s} \leq q \leq 130\text{ cm}^2/\text{s}$ での砂州は、それ以下の流量での砂州に比し、波長・波高が著しく小さくなり、発達を抑えられる。

②同じ水理条件の時、均一砂れき床の単列砂州に比べ砂州波長は長くなる。

③混合砂れき床での砂州の発生は均一砂れき床での砂州の発生より早い。

④混合砂れき床での単列砂州は、前縁付近での大きい砂粒径の領域とその他の小さい砂粒径の領域に明確に分かれている。

⑤均一砂れき床の単列砂州に比べ砂州前縁の傾斜はゆるやかになる。

これらの混合砂れき床の単列砂州は、粒径別流砂量の場所的不均衡によっておこっており、次のように説明される。

混合砂れき河床においては平均粒径よりも粗い砂は一樣粒径の場合よりも動きやすく、細かい砂は動きにくくなるため⁹⁾¹⁰⁾、流砂量に占める粗い砂の割合は高くなる。粗い砂を中心とする流砂運動の非平衡性のため、砂州前縁がす早く形成され、均一砂れき床の場合より砂州の形成は早い。このとき、砂州前縁は粗い砂から構成され、流れの早い瀬の部分では粗い砂がより多く流れるため、その部分の粒度組成は細かくなる。粒径の粗い砂は限界掃流力も大きいので、混合砂れき床において、砂州を形成する流量範囲は平均粒径の同じ均一砂れき床の場合より大きくなる。しかし、 $60\text{ cm}^2/\text{s} \leq q \leq 130\text{ cm}^2/\text{s}$ では水深が大きくなることにより流れの

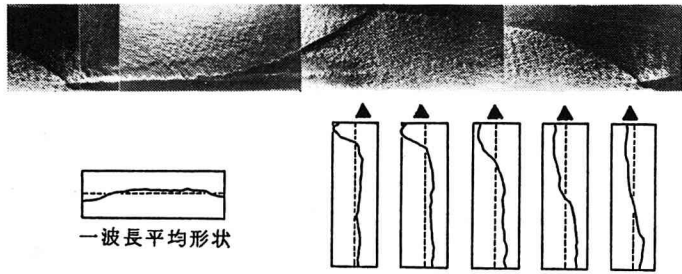


写真-1 均一砂れき床で形成される平衡状態の単列砂州の横断面形状

(Run 3, $q = 40\text{ cm}^2/\text{s}$)



一波長平均形状

写真-2 混合砂れき床で形成される平衡状態の単列砂州の横断面形状

(Run 15, $q = 40\text{ cm}^2/\text{s}$)



一波長平均形状

写真-3 混合砂れき床で形成される平衡状態の単列

砂州の横断面形状 (Run 17, $q = 60\text{ cm}^2/\text{s}$)

横断方向の自由度が小さくなり、砂州を発達させる効果が弱まる。このため、写真-3にみられるようにこの流量範囲では波長・波高とも著しく小さくなる。

一方、均一粒径の砂州が発生する流量である $30\text{ cm}^2/\text{s} \leq q \leq 50\text{ cm}^2/\text{s}$ では、粗い砂が大きい運動量を持ち、砂州前縁をのりこえて堆積しようとする傾向にあるため、砂州の波長は均一砂れき床での砂州波長より長くなる。また、混合粒径河床は粒度分布の広い砂から構成されるため、流砂が砂州前縁斜面上に堆積するとき、堆積する位置が粒径ごとに異なる。そのため混合砂れき床の砂州前縁はゆるやかになる。

写真-4に粒度分布が細くなる瀬の部分で形成されている河

床波を示す。混合砂れき床からなる砂州では、粒度分布の細かい瀬で相対的に h_0/d が大きくなり、河床波が発生しやすくなる。

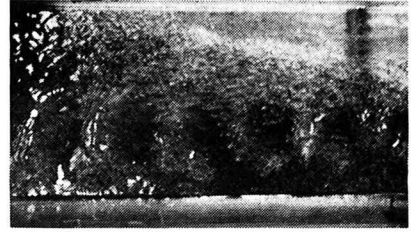


写真-4 砂州の瀬に形成された河床波

(Run 15, $q = 40\text{ cm}^2/\text{s}$)

6. あとがき

- (1) 砂州の形成範囲内で流量を変化させる時、単列砂州が十分発達した後の流量変化は砂州の変形にはほとんど寄与しない。
- (2) 流れの非定常性が河床形態の遷移に及ぼす影響は、そのときに存在する河床形態によって異なる。特に減水時に砂州や流下反砂堆が存在するとき、一定流量では砂州を生じないような流量範囲であっても砂州が形成される。
- (3) 混合砂れき床では粒度のふるい分けがおこるため、砂州前縁付近では粒径が粗くなり、流れの速い瀬の部分では粒径が細くなる。また均一粒径からなる河床に比べ、砂州発生までの時間が短くなり、砂州を形成する流量範囲も広がる。
- (4) 均一粒径河床において砂州が形成される流量範囲で、混合砂れき床の実験を行なうと、形成される砂州の前縁の傾斜はゆるやかになり、波長は長くなる。

参 考 文 献

- (1) 山本晃一：河道特性論ノート〔1〕-護岸論のために一，土研資料第625号，建設省土木研究所，1981。
- (2) 高木譲治・牧野成雄・竹本成行・森田康志：石狩川下流部における洪水流と河床変動の観測，第26回水理講演会論文集，1982。
- (3) 黒木幹男・岸 力：石狩川の抵抗特性と河床波形状の変化，第27回水理講演会論文集，1983。
- (4) 芦田和男・中川一・加藤均：流量変化に伴う河床波の応答に関する研究，京大防災研年報，第25号B-2。
- (5) 澤井健二：正弦波状流量変化に伴う河床波の応答に関する実験，第39回年次講演会概要集，1984。
- (6) 中川博次・辻本哲郎：Lower Regimeにおける非定常移動床流れの抵抗の遅れ性状，第25回水理講演会論文集，1981。
- (7) 福岡捷二・安陪和雄・五十嵐崇博：交互砂州の変形過程に関する実験的研究，第28回水理講演会論文集，1984。
- (8) 福岡捷二・内島邦秀・山坂昌成・早川博：交互砂州上の流砂量分布，第27回水理講演会論文集，1983。
- (9) 平野宗夫：混合砂れき河床の変動と平衡河床に関する研究，土木学会論文報告集，第207号，1972。
- (10) 芦田和男・道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究，京大防災研年報，第14号B。