砂混じり礫河床上の交互砂州における 流砂動態に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SEDIMENT BEHAVIOR ON ALTERNATE GRAVEL-BARS

溝口 敦子

Atsuko MIZOGUCHI

正会員 博(工) 名城大学准教授 理工学部建設システム工学科
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

These days, more information about the physical surface condition of riverbeds is needed for good river management to be able to take the habitat of river organisms into account. However, it is difficult to examine either sediment conditions at the surface or the substrate structure in detail because of problems in predicting sediment behavior in a real river. Furthermore, the attributes of mixed sediment transport vary depending on physical conditions, making it difficult to describe using numerical simulations. Therefore, a series of flume experiments were conducted in order to examine sediment behavior through alternate bars composed of sand and gravel. These experiments demonstrated the characteristics of fine and coarse sediment movement and indicated the plane distribution of sediment transport on the bars. Additionally, results indicated the impact of fine sediment supply on bed degradation, as well as on bar-morphology.

Key Words : Alternate bars, sediment transport, sediment mixture, sediment supply

1. はじめに

近年、治水だけでなく環境を視野にいれた河川整備のために必要性が増したことに加え、数値解析・計測等の技術・研究も進展したことから、より細かな移動床現象の解明が行われつつある。例えば、砂州に関する研究について、これまで、治水上問題となる河道の洗掘深の予測に必要な波高の予測が活発に行われてきた¹⁾。しかし、数十年のうちに、生物に利用される場など砂州の環境的機能²⁾などにも関心が高まり、実河川の砂州を意識した砂州上の粒度分布³⁾や砂州の形状とそれを基盤に形成される低水路特性の議論⁴⁾・⁵⁾も詳細に行われるようになり、新たな展開を見せている。また、これまでの様々な移動床現象の知見の集積もあり、理想的な直線河道の議論だけでなく、数値解析を用いて実際の河川で起こっている現象を説明しようとする研究が増えてきている。

このように詳細現象、実河川での現象解明が進む中、一様粒径でなく混合粒径で構成された河床を対象とした様々なアプローチも行われつつある。

混合粒径で構成された河床を対象として、河床変動を数値的に解くためには、粒径別の流砂量の算定が必要と

なる。これまでには、Egiazaroff式を芦田・道上が修正した粒径別限界掃流力⁶⁾と芦田・道上の粒径別平衡流砂量式⁷⁾から流砂量を算定し、さらに平野の交換層の理論⁸⁾を用いて河床変動解析を行い、現象を論じる研究がいくつもおこなわれてきた⁵⁾・⁹⁾。ただし、この方法は交換層厚の決定方法などの課題を残していることも指摘されており、実際にどこまで適用できるのかについて、明確にされていない。一方、特定した現象を追及するために、一部の河床材料が動かない河床（例えば巨礫と砂が混在している河床）での掃流砂、浮遊砂量の取り扱いに関する研究^{10)~13)}など別のアプローチからの研究もおこなわれてきた。最近では、さらにそれらを進展させる研究や、平衡流砂量式を用いず非平衡流砂量の考え方をを用いた解析的アプローチなど多様な研究が活発に行われている。例えば、福島ら¹⁴⁾、関根ら¹⁵⁾、藤田ら¹⁶⁾、Gramsら¹⁷⁾は、動かない礫で構成された河床からの砂の抜け出し・充填現象を取り扱った検討を行っており、また、溝口¹⁸⁾は、山地における礫間を流れる砂の掃流砂量算定方法について実験的検討を行っている。さらに、長田ら¹⁹⁾は、石礫河川の河床変動をとらえるための数値解析手法を提案している。

上記のように、混合粒径で構成された河床の河床変動や流砂量の予測は、多岐にわたるアプローチがとられている。このことからわかるように、混合粒径で構成された河床は、粒度分布の設定など様々な条件が考えられ、それにより流送形態も異なるなど特有なケースが存在する。そのために、平衡流砂量について一意的に予測式を決めるのは難しいと言える。つまり、混合粒径については、ある程度条件を想定した検討をする必要があり、かつ、すべての条件に適応する予測式が確立されていないために、現状では、実験などを用いて実現象を検討することが重要となる。

そこで、本研究では、混合粒径で構成された河床の中でも特に礫河道を想定した基礎現象を調べるため砂混じり礫で構成された河床を用いた実験を行い、砂州形成時の堆積構造や流砂量特性について調べる。これまでの混合粒径河床上の砂州の特徴を調べた研究は、様々な状況下で表層の粒度構成や波高に着目し、議論をしているものがほとんどである²⁰⁾。また、土砂供給の粒度分布等に着眼した研究は行われておらず、河床下の状態や砂の流下速度について検討した例はない。本研究ではそれらに着目し、まず実験を用いて、おこりうる現象を調べた。

ここで、本研究に関連のある砂混じり礫河床の流砂動態として、既往の研究の一部を示す。鈴木・加藤²¹⁾は、Parkerが指摘した動的粗粒化に伴う鉛直分級に着目し、実験を用いて調べ、元河床から流水経験後の表層粒度分布を予測する式の検討を行っている。また、池田・伊勢屋^{22)・23)}は、砂の流れの上に礫が滑るように流れる現象が存在することを指摘し、鈴木ら²⁴⁾は、砂礫混合河床における礫集合部の形成を論じるのにあたり、池田らが示した鉛直分級が卓越する条件が存在することを指摘している。また、池田・伊勢屋は、砂混じり礫河床の特徴を論じるにあたり、同じ条件でも砂のみの河床より礫がある程度混じっていた方がより流砂量を増加させるケースが存在することを指摘している。これについて鈴木ら²⁵⁾は実験的に検討し、礫の突出効果や遮蔽効果、細砂による減摩効果、粗砂による連行効果について検討を行っている。一方、海外では、Wilcockら^{26)・27)}が、それらに関わる現象に着目し、礫河川を対象として現象を論じるには、礫間に存在する砂が礫の流れに及ぼす影響が重要と考え、それらを考慮し粒径別限界掃流力に相当するreference shear stressを検討し、二粒径および複数混合粒径に対応した独自の流砂量式を提案している。

こうした成果を受け、ここでは、上述した砂混じり礫河床特有の流砂現象による砂州の粒度分布構造の特徴について調べる。また、礫床に大きな影響を与えうる砂と礫の供給比に着目し、表層粒度等について検討を行った。

なお、実河川における砂州は非定常流量下で形成されており、一定流量で形成された砂州の特徴とは異なる可能性も否めない。しかし、砂州形成時に起こる現象やその特徴を知ることは基礎的知見を得るために重要であり、

かつ、簡便性からも一定流量で実験を行うこととした。

2. 平衡状態における砂州上での土砂の流れおよび堆積層の粒度分布の特徴

(1) 砂州形成実験概要

実験は、砂混じり礫で構成された砂州の動態を調べるため、ステンレス壁を有する幅30cm、長さ16mの水路を用いて、表-1の条件で実験を行った。

水路の概要を図-1に示す。水路には、前述のように礫床河川の河床条件を意識し、主材料として三河珪砂3号（平均粒径2.2mm程度）、副材料として5号（平均粒径0.55mm程度）を8：2で混ぜ合わせ、流下方向に約12.5mの区間を厚さ7.5cmで敷き均した。下流では横断方向の偏りがわかるように、5分割した採砂箱を置き、流出土砂を採取した。上流では、土砂供給装置を用いて、予備実験での計測値を参考に決めた混合割合および量の土砂を定常的に投入した。なお、予備実験では、土砂供給を行わず上流からの河床低下が伝播しない短時間で実施し、河床高、下流端からの土砂流出量、その粒度を計測した。

実験開始直後に、ポイントゲージを用いて水深を計測し、実験中には、流下方向60cmおきに計測断面を設定し、レーザー変位計を用いて各横断面の河床高を計測した。あわせて、下流端での土砂の採取、砂州の動きを把握するために前縁線位置のスケッチ、砂の流れを把握するためにビデオ撮影などを行った。

(2) 砂州の形成状況概要

実験では、各ケースともに、通水開始10分後には交互砂州が現れ、発達し、流下していくのが見られた。参考に、図-2に、計測区間における横断河床高低差の最大値と定義した砂州波高の時間変化を示す。この図から、ほぼ安定した砂州が形成されているのがわかる。

表-1：実験条件

Case	流量(m ³ /s)	勾配	水路幅(m)	初期平均水深(cm)	供給土砂量(g/min/0.3m)	土砂供給割合粗砂：細砂
A	0.003	1/82	0.3	2.1	540	10：1
B	0.0018	1/50	0.3	1.8	700	47：3

図-1 実験水路概要

図-2 各実験における波高の時間変化

図-3 実験CaseAにおける河床変位量の時間変化

図-4 実験CaseAにおける総流出土砂量の時間変化

図-5 実験CaseAにおける砂の流出量時間変化

図-6 実験CaseAにおける縦断方向平均・最高・最深河床高横断形状と横断方向への流出土砂の偏り

図-7 実験CaseBにおける縦断方向平均・最高・最深河床高横断形状と横断方向への流出土砂の偏り

(3) 流出土砂量から見る砂州上の流下土砂量の特徴

下流からの流出土砂量を調べたところ、砂州の形成に伴い、流出土砂量は、横断方向に偏りを見せた。図-3～5に、下流端での河床高、砂と礫を合わせた総流出土砂量、砂のみの流出土砂量の時間変化について、一波長分の砂州が流下した時間帯を抽出し、左右岸および水路中

央の値で示す。これによると、河床高、総流出土砂量は左右岸付近で大きく変動しているが、砂については、常に中央で多く流出していることがわかる。また、左右岸の河床高のピークと総流出土砂量のピークはずれており、左右岸それぞれ、高い値を示した後に総流出土砂量が増加していることが分かる。砂州の形成に伴う総流出土砂量の変動は、著者が以前に示した一様粒径の砂州形成時²⁸⁾と同様であるが、砂の流出状況が異なっている。ほぼ平衡状態となった砂州河床からの土砂流出状態について横断面での特徴を調べると、縦断方向に平均した河床高の横断形状が、藤田らに指摘された横断方向への土砂の動きによって形成されるかまぼこ型形状を強く有しているCaseBとそうでないCaseAでは、総流出土砂量の横断的偏りの傾向が異なり、特にメイン材料の礫の流出が壁面または水路中央部で多くなっている(図-6, 7)。ただし、細粒分の砂については、どちらもピークが壁面付近でなく、特にCaseAでは明確に水路中央付近で多く流出していることがわかる。これは、交互砂州の形成過程に砂と礫が水路中央に運ばれる過程で、砂が砂州堆積域に捕捉されるために壁面付近でなく水路中央よりでの流出が多くなると考えられる。なお、実験は再現性の確保のため2回以上行い、同様な結果を確認している。また、堆積域への砂の捕捉については、後述する。

(4) 着色土砂の投入による砂州形成時の表層および堆積層の状態に関する検討

砂州形成後、供給土砂を青と赤に着色した砂礫に切り替え2時間程度通水し、通水停止後に断面を切り出し写真撮影により、堆積層の様子をうかがった。

その結果を図-8, 9に示す。砂州流下時の土砂の入れ替わりは、着色土砂で示される層で起こっていることが予測される。CaseBでは着色土砂と無着色土砂の境目の形状がどの断面でも同じ形でみられる。写真から位置を読み取ったところ、図-7に示した縦断方向最深河床高とおおよそ同じ位置を示しており、縦断方向最深河床以上の領域で土砂の入れ替わりが起こっていると言える。また、着色土砂の下層で青色の砂が水路中央にまとまって存在しており堆積部に捕捉されていることがわかる。これについては、CaseAでも、同様の傾向が見られた。

着色土砂の縦断方向の分布について調べると、両ケースともに赤色に着色した礫は下流部まで確認されるが、青色の砂は比較的上流部にのみ存在しており、本実験条件では、砂と礫の流下速度が格段に異なることがわかる。これらは、すべて砂混じり礫河床の特徴が深く関係している。第一章に既往の研究成果で示したように、砂の存在割合が小さい場合、移動床表層は粗粒化し砂は礫に隠れた状態で少ない量流下する傾向にあり、表層は元河床よりも粗粒化する。この特徴と砂州の形成時の砂礫の流れにより、水路中央部に運ばれた礫と砂のうち、砂は中央部の下層に比較的多く捕捉されながら運ばれ、礫は、速く流下していくと言える。

なお、混合粒径で構成された河床を対象に行われた既往の研究と同様に、本実験でも、砂州前縁付近に細粒分が多く見られた（図-9）。これは、砂州の堆積域つまり前縁線の上流部まで礫の下に隠れた状態で礫とともに流送されていた細粒分が、礫とともに前縁付近に堆積するのに対し、深掘れ部では掃流力が強く動的粗粒化を起し、かつ、細粒分がとどまれないことにより起こっていると考えられる。こうした砂州特有の流れのメカニズムにより、砂州の形成とともに細粒分は水路中央部分に多く運ばれ堆積層に補足され、結果として下流からの流出も中央部でのみ多く確認されると言える。なお、通水後、表層を薄くはぎ、礫の存在割合をCaseAで測定したところ、図-10に示すように、左右岸の深掘れ部で高く、中央部で元河床程度となっていた。このことから、左右岸は粗粒化していることがわかり、水路中央部に砂が多く存在していることが確認される。

3. 土砂供給条件による砂州地形の変化と流砂量、表層粒度の変化

(1) 検討内容

混合粒径河床は、上流からの土砂供給条件により、様々な影響を受ける可能性がある。特に、表層の粗粒化が起きる本設定条件では、礫と砂の供給比により表層粒度が変化し、河床の状況も変化する可能性がある。供給土砂の質の重要性に着目し、前節のCaseA, Bを基本ケースとし、砂州形成後供給条件を表のように変化させる実験を行った。

表-2 切り替え後の土砂供給条件

Case	供給土砂量 (g/min/0.3m)	礫:砂	Case	供給土砂量 (g/min/0.3m)	礫:砂
A0	0	—	B0	0	—
A1	540	2:1	B1	700	0:1
A2	540	1:2			
A3	540	0:1			

(2) 土砂供給の質が及ぼす影響

上流から供給される土砂の細粒化は、まず、表層粒度を変化させ、水理条件を変化させるために、河床形態をも変化させる可能性が高い。本実験で、CaseA2, A3のように砂の供給割合を増加させると、砂は基本ケースより速く、砂州の表面を覆うように流下していった（図-11）。CaseA2, A3においては、この変化とともに、初期に形成されていた砂州は徐々に波高を低くした（図-12）。また、砂の供給により、河床材料が活発に動き出し、図-13に示すように、流出土砂量はいっしょに増加する。砂の割合を多く供給すればするほど、供給を変化させた時から下流からの流出土砂量が増加するまでに要する時間が、短いことが確認された。同時に砂の流下速度も増加しており、例えば、着色土砂の供給に切り替えてから下流端で着色砂が流出するまでに要する時間は、基本ケースとなるCaseAでは、比較的速い砂粒で40分程度

図-8 各断面における礫（赤）砂（青）の存在状況(CaseA)

図-9 各断面および表層における礫（赤）砂（青）の存在状況(CaseB)

図-10 左右岸・中央における河床高と礫の体積割合 (CaseA)

要しているにも関わらず、CaseA2では、わずか10分後となった。これは、表層の砂の割合が多いと、礫が砂を覆うように流下してきて砂州にいったん捕捉される過程が無くなり、より速く流下するようになると考えられる。

なお、本実験では、供給する礫と砂の割合を変化させただけで、供給する量を一定に保っている。しかし、細砂の供給は、流出土砂を増加させることから、河床低下を起こした。河床低下は、上流から起きていることが、縦断方向に示した横断方向平均河床高の時間変化を示す

図-11 CaseA3時の砂で覆われていく砂州の様子（左）とCaseA2時の砂上で浮き上がって動いていた礫の痕跡（右）

図-12 CaseA0-A3における波高の変化

図-13 CaseA1-A3における流出土砂量の時間変化

図-14 CaseA0-A3における横断方向平均河床変化量

図-15 CaseB0-B1における横断方向平均河床変化量

図-14, 15から確認できる。興味深いことに、河床低下の状況は、砂のみの供給ケース（CaseA3, B1）により、土砂供給をしないケース（CaseA0, B0）のほうが、低下の進行速度が遅くなっている。つまり、砂の供給は、礫を活発に動かすため、砂礫ともに供給しないより、河

図-16 水路中央表層における礫の体積占有率と流砂量

床を細粒化させながら低下させるといえる。実際に、池田ら²²⁾が指摘した砂の流れが礫を浮き上がらせて流下する現象がCaseA2, A1で見られ（図-11）、砂の表層割合が高いときの特有の現象がみられた。

4. 砂混じり礫河床における課題

第2, 3章の検討から、砂混じり礫河床の土砂動態が砂州形成河道の表層、下層を含めた粒度環境に非常に重要な役割を示していることがうかがえる。第1章に示した既往の研究にあるような砂まじり礫河床の流砂挙動、つまり動的粗粒化や鉛直分級が、砂州の形成時に砂州堆積域に砂を捕捉する。また、砂混じり礫河床の土砂動態には、土砂供給およびそれによって決まる表層粒度の状態が非常に重要となる。その決まり方は、単純でなく、特に、砂の供給条件の変化が河道に与える影響は深刻であるため、この現象を追求する必要がある。

実験から得られた水路中央部表層における砂の体積占有率割合（実験後表層をはぎ取り計測）と流出土砂量の関係を図-16に示す。なお、それにあわせ、砂混じり礫河床（砂の割合36%まで）で検討されたWilcockらの式²⁶⁾と芦田・道上の式から算出される粒径別流砂量を参考に合わせて示す。また、表層粒度は、左右岸付近で粗く中央付近で細かいため横断的なばらつきがあるが、細粒分が多くなるA2, A3ではばらつきが少なくなるため、中央値で代表させ図を描写している。この図によると、実験値は、表層の砂の体積割合が0.3以上となることから、急激に礫と砂ともに流砂量が増えていることが確認される。細粒分割合0.2の実験値流砂量には、砂州による河床の凹凸および流砂量の平面分布の影響が含まれており、流砂量式との比較は難しい。しかし、細粒分が多いケースについては、砂州波高は低く、それほど砂州による影響を受けておらず、かつ、流砂量は時間的にほぼ一定、下流部の平均河床高は縦断的にほぼ一定になっていることから平衡流砂量としてみなせるとすると、細粒分の増加による礫流砂量の増加は、これまでの平衡流砂量算定モデルでは表現できていないことが分かる。これまでの流砂量モデルには、例えば、表層でおこる砂の流れが礫を持ち上げ流送する効果など砂混じり礫河床特有の現象はとりこまれておらず、著者が以前に検討した数値解析モデル⁹⁾を適用しても、砂州は描写できるが堆積

層の粒度分布, つまり水路中央部の細粒化の描写はできなかった. 今後, 砂混じり礫河床特有の現象を意識したうえで, さらなる現象の解明, 検討が必要だと考える.

5. 結論

本研究では, 砂混じり礫河床を対象とし, 砂州の形成に伴う粒度の変化, 流砂特性の変化およびそれに土砂供給条件が及ぼす影響を調べる実験を行った. その結果から, 以下の現象が現れることを示した.

- ・砂州形成実験でも, 従来から言われているように表層粗粒化がみられ, この影響を受け, 堆積層の粒度分布が形成された. つまり, 砂州形成時には, 砂州特有の砂の流れと砂と礫の鉛直分級現象によって, 細粒分の砂は, 水路中央に集まり, 堆積層に多く存在した.
- ・砂州横断形状 (いわゆるかまぼこ型形状) の発達の有無により流れが変化するため, 主材料となる礫の流出は, 砂州横断形状が発達している場合は壁際で多く, 発達していない場合は水路中央部で多い.
- ・土砂供給があってもその粒径が河床構成主材料より細くなれば, 表層粒度をいち早く変化させ, 河床を活発に動かすことで広範囲で河床形状が大きく変化するとともに, その供給量が少なければ上流部から河床低下が促進される.

既往の研究で指摘されているように, 砂を多く含む河床は礫のみの河床より土砂を活発に動かす. そのため, 礫床河川に供給される土砂の砂の量と割合は, 砂州河道に大きな影響を与える可能性があることが本研究により示された. 特に河床の主材料よりも細かいものを多く投入する際には, その量によって河床形態の変化や河床低下を促進する可能性があり, 注意が必要となる. 逆にいえば, 礫床河川において細粒分の供給量が減っているために, 予想以上に礫が動かなくなっている河道がある可能性もある. 今後, 今回取り扱った現象をつきつめ, 現象の詳細や解析的な再現を検討するとともに, 実河川の現象に照らしあわせ, その重要性を確かめる必要がある.

参考文献

- 1) 例えば, 村本嘉雄, 藤田裕一郎: 中規模河床形態の分類と形成条件, 第22回水理講演会論文集, 1978.
- 2) 例えば, 尾花まき子, 辻本哲郎: 砂州河川の景観と河川生態系の構造にもとづく生態的機能評価へのアプローチ, 土木学会水工学論文集, Vol.53, pp.1183-1188, 2009.
- 3) 例えば, 忠津哲也, 下條康之, 内田龍彦, 福岡捷二: 洪水流による砂州の移動・変形と砂州粒度構成の変化, 河川技術論文集, Vol.16, pp.119-124, 2010.
- 4) 例えば, 益本孝彦, 渡邊康玄, 佐々木章允: 洪水減水期における水みち形成に関する実験, 河川技術論文集, Vol.16, pp.119-124, 2009.
- 5) 例えば, 寺本敦子, 辻本哲郎: 砂州形状の特性と平水時の流路構造, 水工学論文集, 第50巻, pp.961-966, 2006.
- 6) 芦田和男, 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, 土木学会論文集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 7) 中川博次, 辻本哲郎: 移動床流れの水理, 技報堂出版, 1986.

- 8) 平野宗夫: Armoringを伴う河床変動について, 土木学会論文集, No.195, pp.55-65, 1971.
- 9) 例えば, 寺本敦子, 辻本哲郎: 卓越砂州モード数へ及ぼす河床の粒度構成の影響, 水工学論文集, 第48巻, 土木学会, pp.1003-1008, 2004.
- 10) 村本嘉雄, 河田恵昭, 布村明彦: 砂礫河川の掃流砂に関する基礎的研究, 京大防災研年報第20号B-2, pp.451-474, 1977.
- 11) 芦田和男, 藤田正治: 河床粒子の浮遊機構とそのモデル化, 第375号/II-6, pp.79-88, 1986.
- 12) 芦田和男, 藤田正治: 平衡および非平衡浮遊砂量算定の確率モデル, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp.107-116, 1986.
- 13) 道上正規, 藤田正治, 北川豊広, 三村光太郎: 空隙の大きな河床への浮遊砂の沈み込み過程と非平衡浮遊砂, 水工学論文集, 第38巻, pp.609-614, 1994.
- 14) 福島雅紀, 末次忠司, 瀬崎智之: 透礫層の形成とその充填機構に関する研究, 水工学論文集, 第50巻, pp.985-990, 2006.
- 15) 関根正人, 林将宏: 礫・シルト充填河床モデルを用いた礫河道の準二次元河床変動解析, 水工学論文集, 第51巻, pp.973-978, 2007.
- 16) 藤田光一, 山原康嗣, 富田陽子, 伊藤嘉奈子, 小路剛志: 大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.547-552, 2007.
- 17) P. E. Gram & P. R. Wilcock: Equilibrium entrainment of fine sediment over a coarse immobile bed, *Water Resources Research*, Vol. 43, W10420, 2007.
- 18) 溝口敦子: 大礫間を流れる砂の流砂量算定に向けた相対水深が小さい場での粗度抵抗・有効掃流力の評価に関する実験的検討, 応用力学論文集, 第13巻, pp. 869-876, 2010.
- 19) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫蛇行河川の二次元河床変動解析法に関する研究, 河川技術論文集, Vol. 15, pp.327-332, 2009.
- 20) 例えば, 三輪浩, 大同淳之, 片山智仁: 交互砂州河床の変動に及ぼす流量・土砂供給条件の影響, 水工学論文集第51巻, pp. 1051-1056, 2007.
- 21) 鈴木幸一, 加藤幸一: 動的平衡状態における混合砂礫河床表層の粗粒化, 第33回水理講演会論文集, pp.415-420, 1989.
- 22) 池田宏, 伊勢屋ふじこ: 粗砂の運ばれやすさに及ぼす細砂の影響, 筑波大学水理実験センター報告, No.9, pp. 43-47, 1985.
- 23) H.Ikeda, F. Iseya: Experimental study of heterogeneous sediment transport, *Experimental Research Center Papers*, University of Tsukuba, 1988.
- 24) 鈴木幸一, 山本裕規, 藤岡貴之: 礫集合部の形成と破壊による混合砂礫河床の流砂量変動, 水工学論文集, 第41巻, pp. 801-806, 1997.
- 25) 鈴木幸一, 栗原崇, 山本裕規: 二粒径混合砂礫による流砂量に及ぼす砂礫の混合効果の検討, 水工学論文集, 第38巻, pp. 627-632, 1994.
- 26) Wilcock, P.R. and S.T. Kenworthy "A two fraction model for the transport of sand/gravel mixtures", *Water Resources Research*, vol.38, 10, pp. 1194 - 2003, 2002.
- 27) Wilcock, P.R. and J.C. Crowe "A surface-based transport model for sand and gravel", *J. Hydraulic Engineering*, vol.129, 2, pp. 120 - 128, 2003.
- 28) 溝口敦子, 辻本哲郎: 砂州形成河床上の流砂量と流砂動態の検討, 水工学論文集, 第52巻, pp.589-594, 2008.
- 29) 藤田裕一郎, 村本嘉雄, 堀池周二: 交互砂州の発達に過程に関する研究, 京都防災研年報, 第24号B-2, pp.411-431, 1971.

(2010. 9. 30受付)