

交互砂州の変形過程に関する実験的研究 Transformation Mechanism of Alternating Bars

東京工業大学 正員 福岡 捷二

東京工業大学 学生員 安 陪 和 雄

東京工業大学 学生員〇五十嵐 崇 博

1. はじめに

洪水時には交互砂州がどのように変形・発達するかを明らかにすることは、流れの抵抗との関係で重要な問題である。しかし、時間的に変化する水理条件下では、その時点の水理量によって流砂量が定まるわけではなく、それまでの履歴が重要となるため、流砂運動は非平衡となる。このため洪水時には巨視的にみても平衡状態の交互砂州が存在し得るかどうか明確でない。非定常流れでの交互砂州の変形問題を扱うには、広い範囲に変化する流れの速度・振幅・周期と、これに対する砂州の発達時間との基本的関係をまず明確にする必要がある。しかし非定常流れで、この問題の解をさぐることは実験水路でさえも容易なことではない。実験的な工夫によって、非定常流れで生ずる砂州の変形の基本過程を定常流れで調べることができれば、現象は観察しやすく、単純化されるものと思われる。

いうまでもなく、非定常流れと定常流れは異なる。非定常流れでの砂州上の流砂運動の特徴は著しい非平衡性にあり、このため砂州の変形が生ずる。もし定常流れでも砂州上の流砂運動の著しい非平衡性をおこすことができれば、非定常流れでも定常流れでも非平衡流砂に伴う砂州の変形機構は類似であると予想される。そこで次のような実験的工夫によって定常流の条件のもとで砂州の変形と合体の機構を調べる。すなわち、ある一定流量 Q_0 で十分に発達した一連の砂州(波長 L_0 ・波高 H_0)を形成させる。それらの一部をその流量条件に適合できない波長(L)波高(H)で置き換える(この砂州が適合する流量は Q_1 で Q_0 ではない)。再び、さきの流量 Q_0 が流れるとき、置き換えられた砂州(L , H の特性をもつ)上の流砂運動は著しい非平衡性を示し、これらの砂州の変形過程は、非定常流下で砂州が変形していく過程と巨視的にみて同じものと考えられる。換言すれば一様な波長・波高をもつ一連の砂州が非定常流れで変形することと、流れに適合しない一連の砂州が定常流れで変形することは、変形を受ける砂州からみると類似の現象とみなせる。そこで非定常流下での砂州の変形を明らかにするための第一段階として、定常流の条件のもとで上述の実験を行なう。河床波の変形についてすでに芦田・澤井¹⁾²⁾³⁾らがこれと類似の考え方で実験・解析を行なっている。彼らは、非定常流量での砂堆を直接的に検討するほかに、種々の形状を有する砂堆を水流あるいは人手で作成し、これに適合しない一定流量を与えてその変形過程を追跡し、非定常流での河床波の変形機構について興味ある知見を得ている。⁴⁾⁵⁾

著者らはすでに一定流量下での砂州の変形・合体機構を非平衡流砂運動との関係で詳細に調べてきた。本研究は、砂州の変形をその上の流れとの関係で、消滅・合体・分裂に分け、それぞれを定義する。この定義を用い、安定な交互砂州の間に人為的に挿入された交互砂州がどのように変形し消滅・合体・分裂をするか、またどのような波長であれば消滅も合体も分裂もせず安定な交互砂州に移行できるかを明らかにし、非定常流量下でおこる交互砂州の変形機構の理解をうる。

2. 砂州の消滅・合体・分裂の定義

砂州の消滅・合体・分裂は、砂州形状とその上の流れとの関係で定義される必要がある。図1は安定な交互砂州の平面形状を示す。一単位の交互砂州は斜線部で示され、この砂州の波長は L である。交互砂州先端には交互砂州を特徴づける深掘れ部が存在しその上の水流は深掘れ部から深掘れ部への蛇行する。

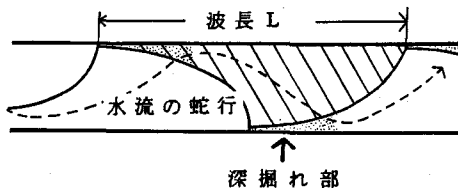


図1 交互砂州の平面形状

2.1 砂州の消滅の定義

図2-(1)のような一連の交互砂州A, B, C, Dを考える。砂州Bの先端⑥が砂州Cの先端⑦に追いつくと(図2-(2))水流は砂州C上で蛇行することができなくなり、砂州Cは砂州に特徴的な平面構造を失なう。そのため砂州Cはもはや砂州と呼ぶことができなくなる。このように砂州Bの先端⑥が砂州Cの先端⑦に追いついた時、これを砂州Cの消滅と定義する。

2.2 砂州の合体の定義

2.1で述べたように砂州Cが消滅すると、砂州B前縁と砂州D前縁は近接する(図3-(1))。この段階で砂州Cが消滅したため、新たに砂州Dを定義し直す必要が生ずる。すでに述べたように交互砂州上では水流の蛇行が伴わなくてはならない。図3-(1)の状態では、砂州B前縁と砂州D前縁の深掘れが近接しているため、砂州B, 砂州Dが一体化し、上流からの水流は、砂州B, D上で蛇行する。そこで砂州Dを斜線部のように定義し直す。砂州Dは砂州Bに追いつかれ、これを砂州の合体と定義する。

2.3 砂州の分裂の定義

図4-(1)のように、砂州B前縁と砂州D前縁の間隔が大きい場合は、砂州B上の蛇行水流のために、新たな砂州が砂州D上の破線の位置に発生する。この砂州が最終的に安定な砂州に移行する時、砂州Dを分裂と定義する(図4-(2))。

3. 実験装置と方法

実験には水路幅0.2 m, 長さ12 m, 勾配1/100の亚克力製循環水路を用いた。砂の粒径は0.77 mmである。水路に $Q = 0.8 \ell / \text{sec}$, $h = 1.4 \text{ cm}$ で通水し、水路全長にわたって安定な交互砂州(波長は $L_0 = 170 \text{ cm}$)を形成させ、その後止水する。

図5のように安定な交互砂州の間に、斜線部で示された流れに適合しない交互砂州B, C, D, Eを人為的に挿入する。砂州C, Dに着目し、それらの砂州が消滅・合体・分裂をおこしやすいように、その直上流側の砂州Bの波長は、安定な砂州波長より短い $\ell = 120 \text{ cm}$ に選ぶ。注) 砂州Cの波長 ℓ_1 , 砂州Dの波長 ℓ_2 を変えて、砂州C, Dの変形を追跡した。

4. 交互砂州の変形過程

図6は流れに適合していない砂州C, Dの波長 ℓ_1, ℓ_2 を種々変化させたときに現われる砂州C, Dの変形を領域(I)~(M)に分けて示したものである。横軸、縦軸はそれぞれ ℓ_1, ℓ_2 を砂州Bの波長 ℓ で無次元化している。砂州Bは直上流の安定な砂州Aの影響で必ず安定な砂州に移行する。

実験の条件と結果を表-1にまとめて示す。

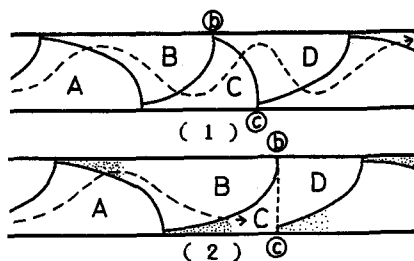


図2 砂州の消滅

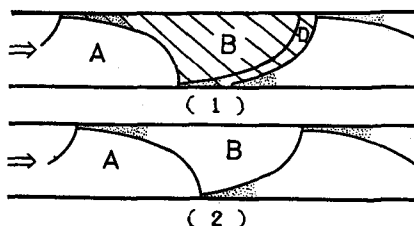


図3 砂州の合体

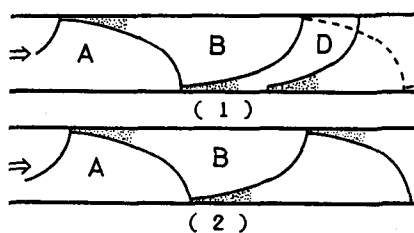


図4 砂州の分裂

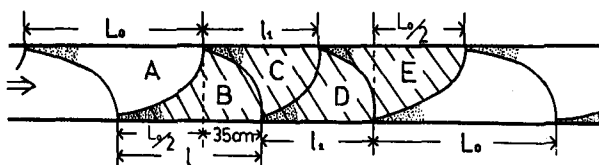


図5 交互砂州の初期形状

注) 砂州Bの波長が安定波長に近いときには、砂州Cは安定な砂州に移行するためである。

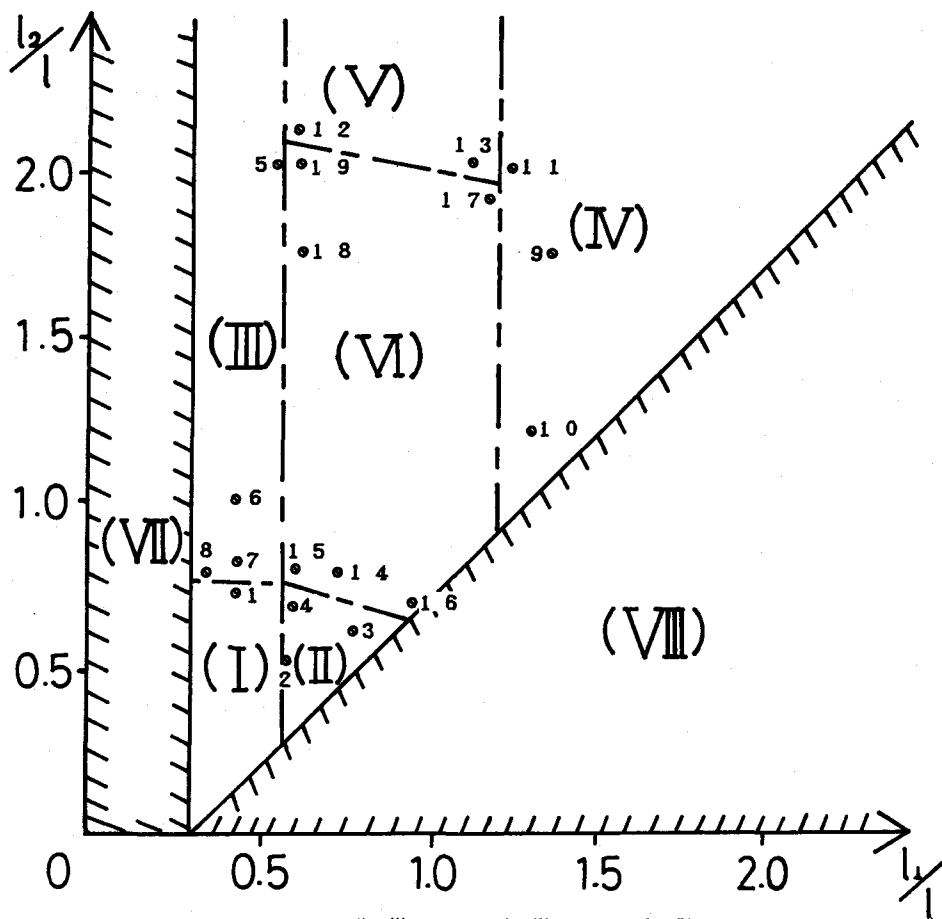


図 6 砂 州 C , 砂 州 D の 変 形

表 - 1 実 験 条 件 と 結 果

領 域	領 域 (I)	領 域 (II)			領 域 (III)				領 域 (IV)			領 域 (V)		領 域 (VI)					
RUN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
砂 州 C の 波 長 ℓ_1 (cm)	50	65	90	70	65	50	50	40	155	150	140	70	130	85	65	110	135	70	70
砂 州 D の 波 長 ℓ_2 (cm)	105	60	70	80	230	115	95	90	200	140	230	240	230	90	90	80	220	200	230
砂 州 C , 砂 州 D の 変 形	砂 州 C は 消 滅 し 砂 州 B と 砂 州 D は 合 体	砂 州 C は 安 定 な 砂 州 に 移 行 し 砂 州 D は 消 滅			砂 州 C は 消 滅 し 砂 州 D は 分 裂				砂 州 C は 分 裂 し 砂 州 D は 分 裂 ま た は 合 体			砂 州 C は 安 定 な 砂 州 に 移 行 し 砂 州 D は 分 裂		砂 州 C , 砂 州 D は い ず れ も 安 定 な 砂 州 に 移 行					

4.1 領域(I)：砂州Cは消滅し、砂州Bと砂州Dは合体する領域

砂州Bの上流には流れに適合した安定な砂州Aが存在するため、砂州Bは消滅することなく徐々に波長を伸ばしていく。しかし砂州Bが十分流れに適合していない段階では砂州C前縁に流砂が堆積できないため、砂州Cは波長を伸ばすことができない。やがて、砂州Bの先端⑥が砂州Cの先端⑦に追いつき、砂州Cは消滅する(図7-(2))。砂州Cが消滅し、砂州B前縁と砂州D前縁が接近すると、上流側の砂州B前縁に流砂が堆積するため、下流側の砂州Dには流砂の供給が少なくなる。このため砂州Dの流下速度は著しく遅くなり、砂州Dは砂州Bに合体される(図7-(3))。

4.2 領域(II)：砂州Cは安定な砂州に移行し砂州Dは消滅する領域

4.1と同様に砂州Bは徐々に波長を伸ばすが4.1と比べると砂州Cの波長が長いいため、砂州Bが安定な砂州に移行するまで、砂州Cは消滅しない。

砂州Bが安定な砂州に移行すると、その下流側の砂州Cでは流れに適合するような流砂の堆積・洗掘が生じ、砂州Cは安定な砂州に移行していく(図8-(2))。しかし砂州Cが十分流れに適合していない段階では、砂州D前縁に流砂が堆積できないため、4.1と同様な機構で砂州Dは消滅する(図8-(3))。その後、砂州Cと砂州Eは合体し、安定な交互砂州に移行する(図8-(4))。

4.3 領域(III)：砂州Cは消滅し、砂州Dは分裂する領域

4.1と同じ機構で砂州Cは消滅する(図9-(2))。

砂州B前縁と砂州D前縁の間隔が大きいため、上流の交互砂州の波長とほぼ等しい位置に流砂が堆積し、砂州C'が現われる(図9-(3))。このため砂州Dはしだいに洗掘され、やがて砂州C'が安定な砂州に移行することにより、砂州Dの分裂がおこる。その後、上流より流れに適合する規則的な交互砂州C', D', E'が水路全長に形成される(図9-(4))。

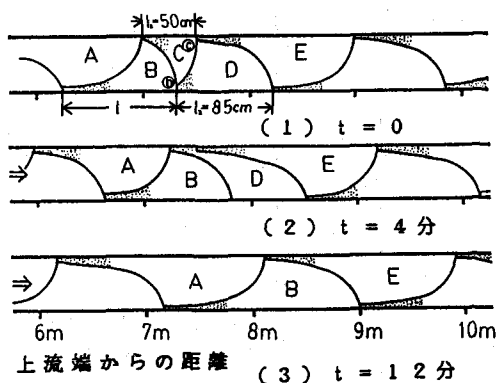


図7 砂州Cは消滅し、砂州BとDは合体 (RUN 1)

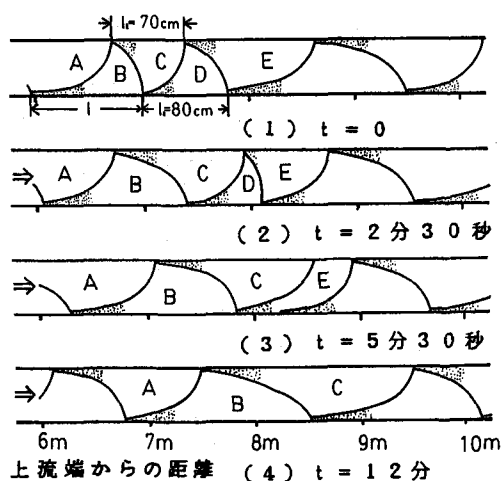


図8 砂州Cは安定な砂州に移行し、砂州Dは消滅

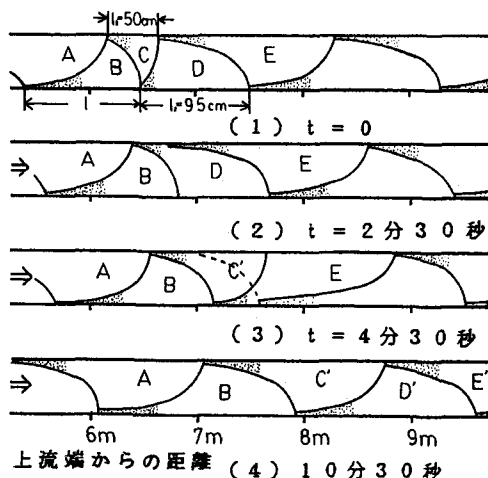


図9 砂州Cは消滅し、砂州Dは分裂 (RUN 7)

4.4 領域(V): 砂州Cは分裂し、砂州Dには分裂・合体の2通りがある場合

4.1と同様に砂州Bは徐々に波長を伸ばし、やがて安定な砂州に移行していく。安定な交互砂州A, B上の蛇行水流のため、砂州A, Bの波長とはほぼ等しい位置に流砂が堆積し、砂州C', D'が現われる(図10-(2))。このため、流れに適合しなかった波長の長い砂州Cはしだいに洗掘され、やがて砂州C', D'は安定な砂州に移行する。このとき、砂州Cは分裂する。

その後、4.3と同じ機構で砂州E'が発生し、砂州Dは分裂する(図10-(3))。砂州Eと砂州E'は、その前縁が近接しているため合体し、やがて安定な交互砂州に移行していく。

本実験では、図10-(2)において砂州D前縁と砂州D'前縁の間隔が大きいため砂州Dは分裂したが、その間隔が小さい場合には、砂州Dは砂州D'に合体されることもある。このように砂州Dは、砂州D前縁と砂州D'前縁の間隔により合体と分裂の2通りの変形をおこす。

4.5 領域(V): 砂州Cは安定な砂州に移行し、砂州Dは分裂する領域

4.2と同じ機構で、砂州Bは安定な砂州に移行し、その影響で砂州Cは徐々に波長を伸ばす(図11-(2))。やがて砂州Cも安定な砂州に移行するが、砂州Dの波長が長いので、4.4と同じ機構で、砂州D', E'が現われる(図11-(3))。このため、砂州Dはしだいに洗掘され、やがて砂州D', E'は安定な砂州に移行する。このように砂州Dは分裂し、その後上流より流れに適合する規則的な交互砂州D', E'が水路全長に形成される(図11-(4))。

4.6 領域(VI): 砂州C, 砂州Dはいずれも安定な砂州に移行する領域

4.2と同じ機構で、砂州Cは安定な砂州に移行する(図12-(2))。しかし、4.2と比べると砂州Dの波長が長いので、砂州Cが安定した砂州に移行するまで砂州Dは消滅しない。そのため、砂州Cが安定な砂州に移行すると、やがて砂州Dも徐々に波長を伸ばし、やがて安定な砂州に移行していく(図12-(3))。

このように砂州C, 砂州Dは、いずれも消滅・合体・分裂せずに安定な交互砂州に移行する。

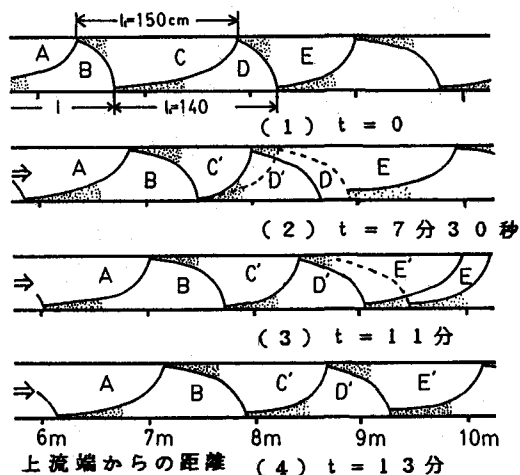


図10 砂州Cは分裂し、砂州Dは分裂または合体(RUN10)

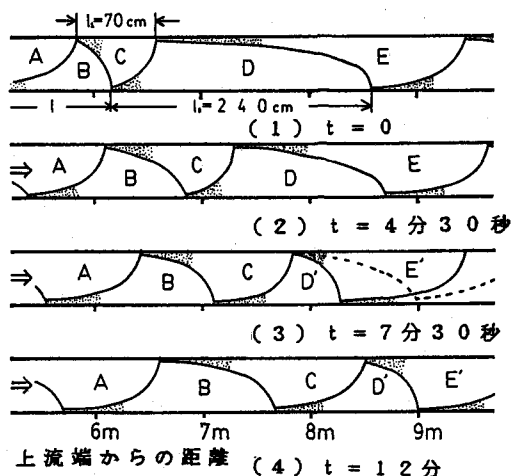
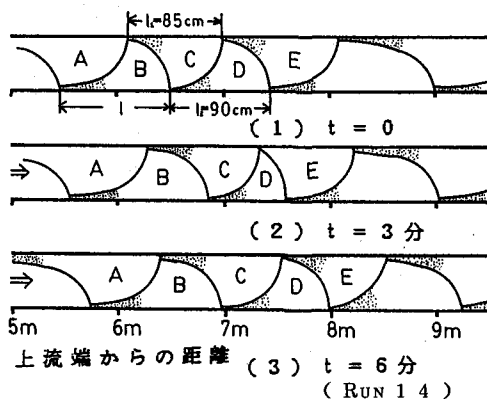


図11 砂州Cは安定な砂州に移行し、砂州Dは分裂(RUN13)



領域 (VD) は、図 1 3-(a) に示すように C が砂州と定義できない領域 ($l_1 < 3.5$)、領域 (VD) は図 1 3-(b) に示すように D が砂州と定義できない領域 ($l_2 < l_1 - 3.5$) であり、物理的には意味のない領域である。

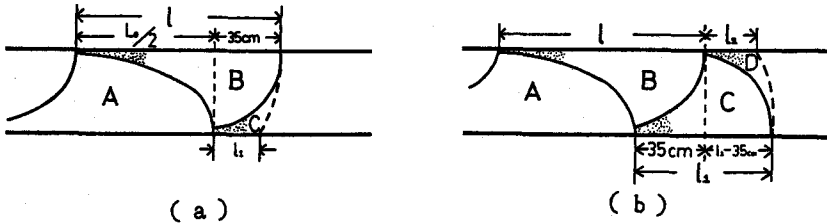


図 1 3 砂州 C, D を定義できない範囲

5. お わ り に

非定常流れでは砂州上の流砂運動の特徴がその非平衡性にあることに着目し、著しい非平衡流砂運動を砂州上におこすことができれば、非定常流れでも定常流れでも砂州の変形機構は類似のものとなるとの予想のもとに、非定常流での砂州の変形過程の理解を得るために、定常流で実験を行なった。得られた主要な結論は次のとおりである。

- (1) 砂州の変形には、分裂・合体と消滅するものがあるが、それぞれがどのような状態の河床形状を指すかを隣り合う砂州の平面形状とその上の流れとの関係で定義した。これらの定義に従うと、砂州の変形過程が矛盾なく説明できることが明らかとなった。
- (2) 上流側から波長を伸ばしてきた砂州の先端が、下流側砂州の先端に追いつくと、追いつかれた砂州上では水流の蛇行がなくなる。そのため、追いつかれた砂州は、砂州としての特徴を失ない、消滅する。
- (3) 砂州の消滅がおこり、2つの砂州前縁が近接すると、上流側の砂州前縁に流砂が堆積する。そのため、下流側の砂州に供給される流砂は少なくなり、2つの砂州は合体する。
- (4) 砂州の消滅がおこっても、2つの砂州前縁の間隔が大きい場合には、下流側の砂州上に新たに砂州が現われる。このため、下流側の砂州がしだいに洗掘され、新たに発生した砂州は安定な砂州に移行する。このとき、下流側の砂州は分裂する。
- (5) 流れに適合した十分に発達した砂州の下流に、流れに適合しない隣り合う砂州があるとき、これらの砂州の変形は、安定な砂州に移行する領域も含め、6領域に分けられる。
- (6) 安定な砂州に移行できる波長の範囲は、変形を受ける砂州の直上流側の砂州波長に依存し、さきの6領域の範囲も変動するが、この場合にも結論(5)は成立する。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、本学学生久米正浩君の協力を得た。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男・澤井健二：河床波の変形過程に関する実験的研究，京大防災研年報，第23号B-2，1980，PP.457-473
- 2) 芦田和男・澤井健二・加藤均：河床波の変形過程に関する実験的研究(2)，京大防災研年報，第24号B-2，1981，PP.283-295
- 3) 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-2，1982，PP.473-491
- 4) 福岡捷二・中村徹立・安陪和雄・五十嵐崇博：移動床流れにおける側岸の水利的役割，第27回水理講演会論文集，1983，PP.681-688
- 5) 福岡捷二・安陪和雄・五十嵐崇博：交互砂州の消滅・合体と分裂，第38回年次講演会概要集，1983，PP.577-578