

高水敷に樹木を有する複断面直線水路の流れと 浮遊砂の輸送について

Flows and Sediment Transport in Compound Channels
with Trees on Flood Plains.

佐野良久・野崎一郎・濱谷 拓

中井正則・菅 和利

By Yoshihisa SANO, Ichiro NOZAKI, Taku HAMAYA,
Masanori NAKAI and Kazutoshi KAN

Flows and sediment transport in compound channels with trees on flood plains were investigated experimentally using flow visualizations and measurements. Time-averaged velocity profiles, characteristics of large scale eddies produced by the shear instability and the mechanism of the sediment transport were considerably changed by vegetation. The deposition of suspended sediments occurred locally at the certain points, and its location was determined by the arrangement of trees.

Keywords: compound channel flow, vegetation, large eddy, deposition

1. まえがき

複断面開水路流れは、低水路と高水敷との流れからなり、その流れは相互に干渉しあう。すなわち、低水路と高水敷の接合部付近にせん断不安定により渦が発生し、その渦によって運動量が交換されるという現象が確認されている¹⁾。また、複断面流れを特徴付けるもうひとつの現象として接合部から斜めに上昇する2次流があり、これについてはいくつかの研究がなされている^{2), 3), 4)}。一方、流砂を含んだ流れでは、低水路と高水敷との接合部に形成される大規模渦によって、低水路の砂が巻き上げられて浮遊砂として高水敷に輸送され、堆積する。この浮遊砂の高水敷への堆積の問題は河川工学上重要な問題である。この観点から、芦田ら^{5), 6)}は低水路から高水敷への浮遊砂の乗り上げについて流れの構造との関連において詳細に研究を行っている。

実河川においては、さらに高水敷に樹木が存在する場合が多く、この樹木が流れと土砂輸送に大きな影響

-
- * 学生会員 東京大学大学院土木工学専攻学生
(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)
- ** 芝浦工業大学工学部土木工学科学生
(〒108 東京都港区芝浦3-9-14)
- *** 正会員 工博 東京大学助手 工学部土木工学科
- **** 正会員 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科

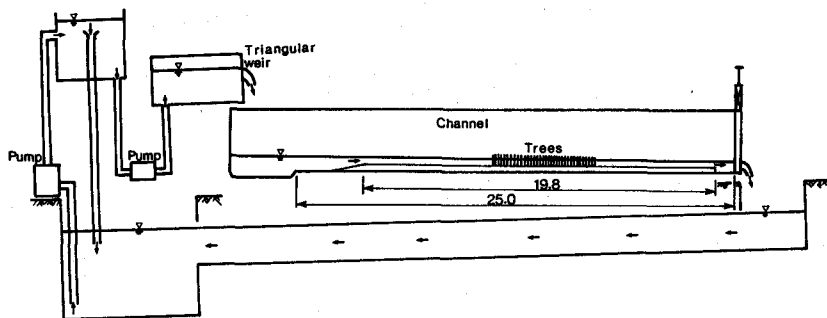


図-1 実験装置

を与えている。この問題は治水上重要であるばかりではなく、また高水敷を有効に利用する上でも無視できない問題である。以上の点を踏まえて、本研究では、高水敷上に樹木を有する場合における複断面直線水路の流れの機構と高水敷での堆砂について実験的に調べ、とくに樹木群の配置形態が高水敷での浮遊砂の堆積位置を決定する機構について重点をおいて論じたものである。

2. 実験

2. 1 実験装置

実験には、図-1に示すような長さ25m、幅1m 高さ60cmの変勾配直線水路に幅20cm 高さ4.8cmの高水敷を約20mにわたって両側に設けたものを用い固定床および移動床で実験を行なった。直径2.8mmの釘を樹木に見立てて上流端から9.4mの地点から格子上に2cm間隔で、3m60cmにわたって設置した。樹木の配列は2列、4列、10列（高水敷全面）の3通りとした（図-2参照）。

2. 2 実験方法

実験は、樹木が存在する範囲でほぼ等流とし、流れの可視化、流速分布の計測ならびに浮遊砂の高水敷への乗り上げの3つについて行なった。

流れの可視化では、低水路と高水敷の接合部底部から染料（ウォーターブルー）を放出し、樹木群が接合部付近での運動量輸送に与える影響を観察した。観察は、 $x=150\sim 280\text{cm}$ 付近（ x は樹木群の始まりの点からの流下方向距離）で行い、さらに写真撮影を行なった。

流速分布の計測は $x=201\text{cm}$ の点で主流の断面内分布を水深方向に数断面測定した。流速測定には3mmの超小型プロペラ流速計、AD変換ボードを装備したパソ

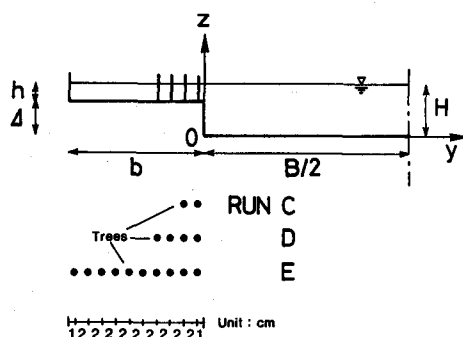


図-2 水路の断面形と樹木の配置

表-1 実験条件

RUN		h(cm)	H(cm)	Q(l/s)	I
Rigid Bed	C-1	1.9	6.7	7.9	1/500
	D-1	1.8	6.8	7.9	1/500
	D-3	4.7	9.5	12.9	1/500
	E-1	1.8	6.8	7.9	1/500
	VC-1	2.3	7.1	11.8	1/400
	VD-1	2.2	7.0	11.1	1/400
	VE-1	2.1	6.9	11.8	1/400
Movable Bed	SC-1	2.1	6.9	9.8	1/350
	SC-3	5.0	9.8	16.1	1/350
	SD-1A	2.2	7.0	9.8	1/350
	SD-1B	2.0	6.8	9.8	1/350
	SD-3	5.1	9.9	16.6	1/350
	SE-1	2.1	6.9	9.8	1/350
	SE-2	3.2	8.0	11.9	1/350
	SE-3	5.2	10.0	16.8	1/350

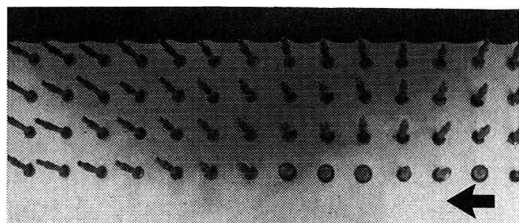


図-3 大規模渦による上昇流(RUN D-3)

コンを用いた。

移動床実験では、低水路に D_{50} (50%粒径) = 0.15mmの砂を低水路に1.5cmの厚さで敷いて3~4時間通水した。通水後に砂を掃き出し、炉乾燥後に重量を0.1mg計測の電子天秤で堆積量を測定した。また、浮遊砂の堆積状況を写真撮影した。なお、給砂は行なっていない。

実験条件を表-1に示す。ここに、B、b：低水路幅および高水数幅、 Δ ：高水数高さ、Q：流量、H、h：低水路および高水数上の水深、I：水路勾配である。なお移動床実験における水深は、通水前の状態のものである。

3. 固定床実験の結果

可視化写真の例を図3、4に示す。図-3はRUN D-3 (樹木4列、水深5cm) の場合 $x=150$ cm付近の接合部付近に形成される大規模渦による上昇流をとらえたものである。同図より、上昇流の流下方向および横方向のスケールはそれぞれ24cmおよび8cm程度であることがわかる。図-4は RUN D-1 (樹木4列、水深2cm) の場合の $x=280$ cm付近の結果である。同図は、染料が十分拡散された後であり、上昇流は確認されないが、運動量の拡散幅は約8cm程度 (樹木4列分) であり流下方向に変化しないことがわかる。これより、流れは完全に発達し、平衡状態に達しているものと考えられる。

RUN VD-1 (樹木4列、水深2cm) の平均流速分布を図-5に示す。高水数の樹木群内で抵抗が増大しているので流速が減少し、接合部側から数えて2~3列目の樹木付近では流速が小さく、低水路から高水数への運動量の輸送が生じており、図-3に示したような大規模渦が発生しているものと思われる。一方、高水数内の3列目の樹木から側壁にかけての領域でも流速差が存在するため、強さは低水路と高水数間ほどではないものの横断方向の運動量の輸送が生じている。この

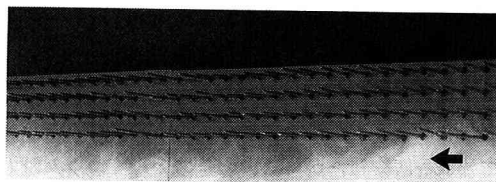


図-4 接合部付近の流況(RUN D-1)

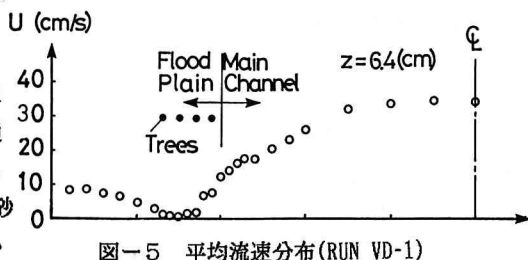


図-5 平均流速分布(RUN VD-1)

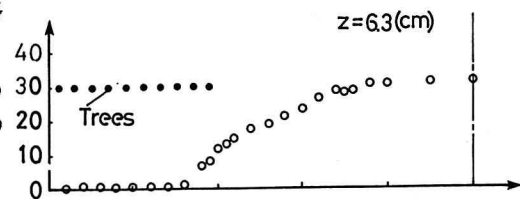


図-7 平均流速分布(RUN VE-1)

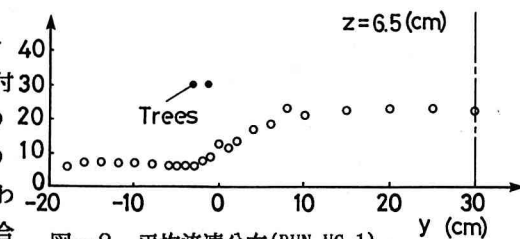


図-8 平均流速分布(RUN VC-1)

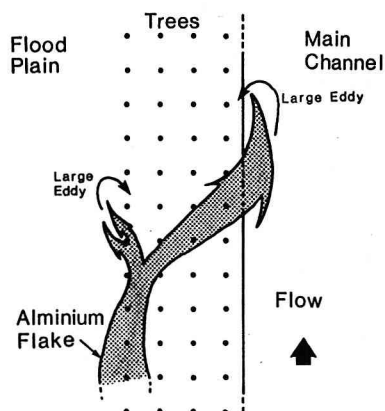


図-6 樹木4列の場合の大規模渦

部分にも大規模渦が発生していると考えられる。すなわち、樹木が4列に並んでいる場合には、互いに反対向きに回転するような2列の渦が形成されているものと思われる。また、水面からアルミニウム粉末をまいて流れを観察したが、そのときのアルミニウム粉末の挙動は図6のようであった。樹木群内に落下したアルミニウム粉末は、最初はほとんど静止している。ところが、あるとき急に接合部側と側壁側に分かれて流れていく。とくに、接合部側に輸送されたものは低水路内に流入して主流に乗って流下していく。このことから一対の渦列が形成されていることがわかる。

RUN VE-1 (樹木10列, 水深2cm) の平均流速分布を図-7に示す。高水敷の流速はほとんどゼロであり、樹木の抵抗が大きいことがわかる。低水路内の流速分布は、RUN VD-1 (樹木4列, 水深2cm) の場合とほとんど変化ない。

RUN VC-1 (樹木2列, 水深2cm) の平均流速分布を図-8に示す。樹木の抵抗は弱く、高水敷上の流速分布を大きく変化させるには至っていない。低水路と高水敷の流速差は前の二つのケースに比べて小さく、接合部付近での速度勾配は小さい。

4. 移動床実験の結果および考察

4. 1 浮遊砂の堆積位置

RUN SD-1B (樹木4列, 水深2cm) 砂の堆積位置の結果について述べる。通水後の堆積状況を撮影した写真を図-9に示す。砂は2列目の樹木を中心として1列～3列の間に分布している。この結果を流速分布と関連させて考察してみる。図-5より、樹木群内での流

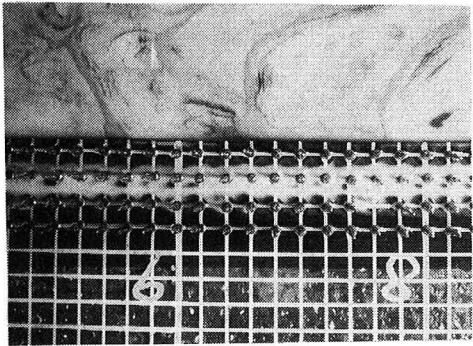


図-9 浮遊砂の堆積位置(RUN SD-1B)

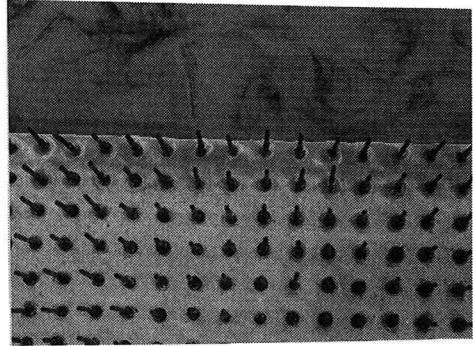


図-10 浮遊砂の堆積位置(RUN SE-3)

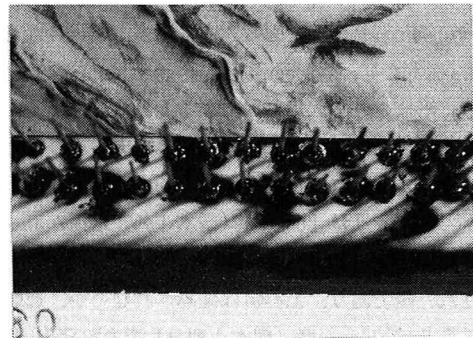


図-11 浮遊砂の堆積位置(RUN SC-1)

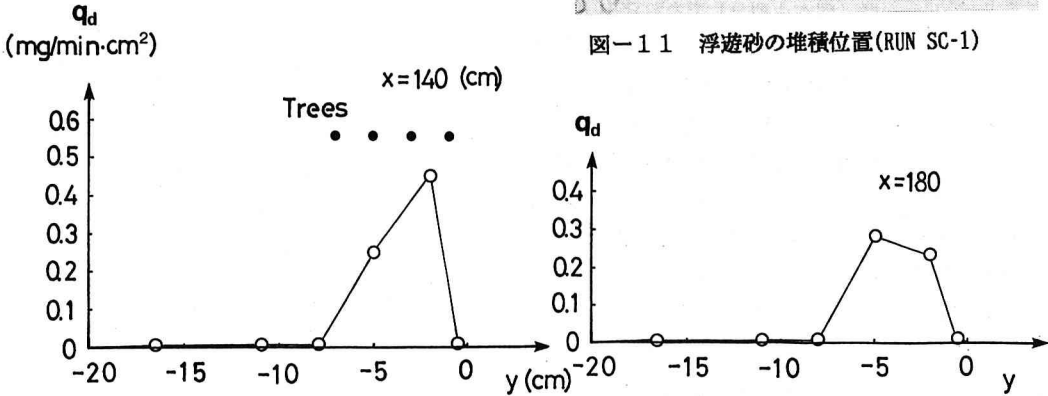


図-12 横断方向の浮遊砂の堆積率分布(RUN SD-1B)

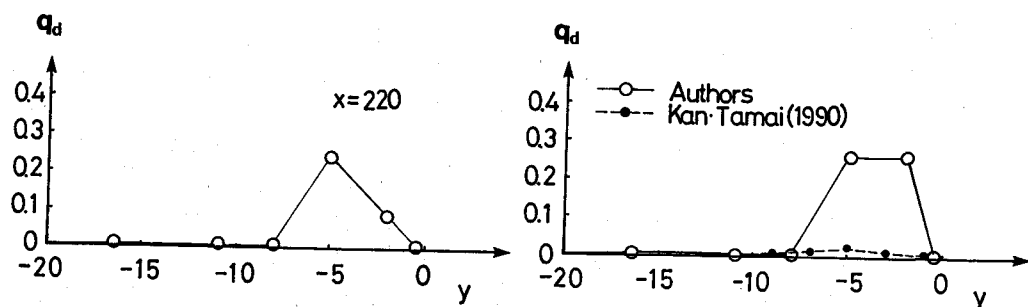


図-1 2 横断方向の浮遊砂の堆積率分布(RUN SD-1B)

つづき

表-2 浮遊砂の堆積率

	1 (2cm)	2 (3cm)	3 (5cm)
SC	1.336	-	0.299
SD	1.410	-	0.447
SE	0.745	0.618	0.376

Unit: mg/(min cm)

速はほとんどゼロに近く、 $y = -5 \sim 10$ cmあたりで強い速度勾配が発生しており、低水路から高水数へ向かう強い拡散が生じている。また、 $y = -15 \sim -5$ cmでも先の領域と反対符号の速度勾配が存在していることより、逆に高水数側壁側から接合部側へ向かう拡散が生じていると考えられる。これらの領域での拡散により砂の輸送が集中する点が $y = -7 \sim -3$ cmあたりの領域と考えられる。すなわち、浮遊した砂は接合部および側壁の両側から樹木群内への拡散に基づき輸送されて、2、3列目の樹木群付近に堆積されるわけである。以上は時間平均した量からの考察であるが、大規模渦に注目

した場合には樹木の両端に形成される渦によって砂が巻き上げられ、移流と拡散によって渦列の接点すなわち $x = -7 \sim -3$ cm付近に輸送されるものと解釈できる。これより、浮遊砂の輸送に及ぼす移流の影響は決して無視できないことがわかるが、その貢献度は不明である。樹木群内に堆積した砂は主流速が小さいために掃流されにくくなっており、この領域に堆積した砂はほとんど流下しないと考えられる。

RUN SE-3 (樹木10列、水深2 cm)の結果を図-10に示す。砂は、低水路側から数えて1列目と2列目の樹木の間に堆積する。この場合の流速分布は図-7に相当するが、同図より高水数上では接合部のごく近傍を除いて、主流速はほとんどゼロである。また、可視観測においても、主流・横断方向ともに時間平均するとほとんど移流がないことを確認している。この場合の高水数への砂の輸送に及ぼす移流の効果は小さく、拡散が重要な役割を果たしていると考えられる。もちろん、接合部付近の大規模渦による移流の効果は無視できないが、渦の横断方向のスケールは図-7よりRUN SD-1Bのケースに比べて小さい。以上より、RUN SD-1Bのケースに比べて流れの浮遊砂の高水数への輸送力は弱く、そのため1列目と2列目の樹木内付近に堆積すると考えられる。ちなみに、この結果は泉ら⁷⁾の側岸に樹木群が存在するときの結果と基本的に同じである。

RUN SC-1 (樹木2列、水深2 cm)の結果を図-11に示す。同図より、砂は $y = -6 \sim 8$ cm付近(低水路側から3列目の樹木に相当)に堆積することがわかる。この場合の流速分布は、図-7に示した通りであるが、高水数上をかなりの流速が流れるために、低水路内の流速は他の2ケースに比べて小さくなっており、接合部付近の速度勾配は相対的に小さい。すなわち、砂の輸送に及ぼす拡散効果は他の2ケースに比べて小さく、浮遊砂が高水数のかなり遠方まで運ばれているのは移流の貢献がかなり大きいことによっていると考えるのが妥当であろう。

4. 2 浮遊砂の堆積率

図-12に浮遊砂の堆積率の横断方向分布の結果を示す。ただし、ここでの堆積率はDeposition rateからErosion rateを差し引いた実質上の堆積率、すなわち、単位時間・単位面積あたりに堆積するnetの浮遊砂の量である。同図より、 $y=-2\sim-5\text{cm}$ にかけて、すなわち、接合部から数えて2、3列目の樹木付近に堆積すること、その最大値は $0.25\sim 0.45\text{mg}/\text{min}\cdot\text{cm}^2$ であること、樹木群の存在しないところでは存在するところと比べて十分少ない堆積量であることがわかる。また、 $y=-5\text{cm}$ での堆積量が流下方向に変化しないのに対して、 $y=-2\text{cm}$ での堆積量は流下にともない減少している。また、同図には菅・玉井⁸⁾による樹木群が存在しない場合の堆積率の横断分布も示してあるので、これと本研究の結果を比較してみる。ただし、彼らの結果は、 $h=4.7\text{cm}$ 、 $Q=13.3\text{ l/s}$ 、 $I=1/500$ の場合であり、本ケースよりかなり水深が高い。堆積率のピークは $y=-5\text{cm}$ 付近にも生じるが、その絶対値は本ケースの場合の8%程度にすぎない。もちろん、水深がかなり違うことによる影響はあるが、それを差し引いても、樹木群が浮遊砂の高水敷への堆積に大きく貢献していることがわかる。なお、 $y=-5\text{cm}$ は3列めの樹木の位置に相当しており、樹木が2列の場合にもこの位置に浮遊砂が堆積していることを考えあわせると2列程度の樹木群では、堆積率の絶対値はかなり大きくなるものの、堆積位置を変化させるほどの影響は与えないと考えられる。

最後に、樹木の列数、および水深を変化させたときの堆積率の変化を表-2に示す。ただし、ここでの値は単位時間・流下方向単位長さあたりのものである。同表より、同一の水深においては、RUN SDすなわち、樹木4列の場合に最も堆積率が大きくなっていることが理解される。このことから、先に示した樹木の側壁側の端付近 $x=-7\text{cm}$ に形成される渦が浮遊砂の輸送・堆積に貢献していることが理解される。以上より、樹木群の両端に形成される一対の逆向きの渦が浮遊砂の堆積機構を決定する大きな要因のひとつであると結論付けられる。また、RUN SE (樹木10本)の結果より水深が低いほど堆積量が大きくなる傾向であることがわかる。最も、これについてはRUN SC、SDの結果が欠如しているために断定はできない。RUN SCとRUN SEの結果を水深が2cmと5cmの場合について比較してみる。水深が2cmの場合には、RUN SCの方が、堆積率が大きいのにに対し、水深が5cmの場合には、逆にRUN SEの方が大きくなっている。この堆積率が逆転する現象は、もちろん水深の違いによると思われるが、具体的なメカニズムについては現在のところ不明である。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費 (一般研究 (B) 代表 東京大学 玉井信行) の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 玉井信行・河原能久：第25回水理講演会論文集、pp.113-118、1981。
- 2) 今本博健・久下俊夫：京大防災研究所年報、第17号B、pp.1-15、1974。
- 3) 今本博健・石垣泰輔：第27回水理講演会論文集、pp.61-66、1983。
- 4) 富永晃宏・江崎一博・小葉竹重機：土木学会論文集、第417号/II-13、pp.129-138、1990。
- 5) 芦田和男・藤田正治・劉 炳義・田中孝昌：京大防災研究所年報、第30号B-2、pp.407-419、1987。
- 6) 芦田和男・藤田正治・劉 炳義：京大防災研究所年報、第31号B-2、pp.461-475、1988。
- 7) 泉 典洋・池田駿介・伊藤力生：第33回水理講演会論文集、pp.313-318、1989。
- 8) 菅 和利・玉井信行：土木学会第45回年次学術講演会概要集第2部、pp.362-363、1990。