

デルタベーンによる二次流と流砂の制御

Secondary Currents and Sediments Control by Delta Vanes in Open Channels

大本照憲*・野仲典理**

By Terunori OHMOTO, Tenri NONAKA

The streamwise development of pairs of longitudinal vortices and their effects on the sediments were investigated experimentally for different vortex pair configurations. Three-components velocity measurements have been made in an open channel flow with a vortex pair artificially generated by two delta vanes protruding from the flat bed. The experimental results showed that delta vanes produced sand ribbons and controlled the longitudinal vortices, the mean motion of the vortex centers qualitatively followed a vortex filament model and the vortices with the flow depth spacing indicated a significant interaction between them.

Keyword: delta vanes, longitudinal vortices, sand ribbons, flow control

1. はじめに

河川湾曲部では遠心力に起因するPrandtlの第1種二次流によって、外岸および内岸付近で、各々、洗掘および堆積を生じるが、近年、これらを回避するために、ベーンと呼ばれる翼板を外岸付近の河床に設置する方法が試みられている¹⁻³⁾。従来の河岸侵食対策工である水制と異なる点は、水制が水はね作用すなわち流心を河岸から遠ざけて洗掘位置を水制前面に移行させるのに対して、ベーン工は湾曲部二次流を抑制し洗掘軽減を図ることに特徴がある。本研究では、直線河道において乱れの非等方性から普遍的に存在するPrandtlの第2種二次流を積極的に引出し、流れと流砂の制御を行うことが目的であり、湾曲部に用いられているベーン工とは二次流の制御に着目している点では同じであるが、対象とする二次流が異なり、ベーンの形状を三角形に変えることによりベーン周辺の局所洗掘を軽減することを試みた。また、著者等⁴⁾は、縦渦列の安定機構に与える境界の影響を明らかにするため、縦渦列が無限領域、半無限領域および有限領域の流れ場に存在した場合の安定性について渦糸モデルにより理論的に検討した。その結果、主流方向に軸を有する水深スケールの縦渦が向きを交互に変えて配列した縦渦列は底面および自由水面の影響により安定することが示された。本研究では、以上の点に着目し、デルタベーンにより二次流を人工的に発生させ、流れおよび流砂の制御の可能性を実験的に検討した。

2. 実験装置及び方法

実験に用いた水路は、長さ10m、幅40cmの亚克力樹脂製可変勾配水路である。移動床実験には、河床

* 正 会 員 工博 熊本大学助教授 工学部土木環境工学科

(〒860 熊本市黒髪2-39-1)

** 正 会 員 工修 建設省土木研究所ダム部ダム水工研究室

(〒305 茨城県つくば市大字旭一番地)

材料として、中央粒径 $d_{50}=0.94\text{mm}$ の均一に近い珪砂が用いられた。河床材料は水路全域に互って厚さ6cmで一様に敷均し、厚さ5mmの直角二等辺三角形の亚克力板で作られたデルタベーンを、図-1のようにベーンが初期河床から高さ $\Delta=3\text{cm}$ 、迎え角 $\theta=10^\circ$ 、その間隔が初期水深の整数倍となるように配置した。実験は、上記の境界条件および表-1の水理条件で通水し、120分経過後に超音波測深器により河床形状および横断方向に1cm間隔で仕切られた捕砂器を用いて掃流砂量の測定が行われた。流速変動は、表-2の水理条件下でベーンより下流に8cmおよび20cmの2断面において計測した。センサーには二次元電磁流速計を使用し、流速の主流方向成分と鉛直方向成分の同時計測、および主流方向成分と横断方向成分の同時計測が同一地点で行われた。計測結果は、サンプリング周波数20HzでAD変換した後、一測点2048個のデータに関して統計処理を施した。なお、表中のVaneの配列欄の符号でO(h)は、図-1に示すようにベーンの中央間隔が水深hでベーンが下流側に開き、流下方向に漸拡させた場合であり、C(h)はベーンの中央間隔が水深hで流下方向に漸縮させた場合である。

3. 流砂の制御

座標系は、図-1に示すベーン間の中央の末端における水路床位置を原点とし、主流方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直上方にz軸を取る。写真-1から写真-4は、各々、図-2に対応したベーン配列で通水し、240分経過した際の河床波の平面状況を示したものである。ベーンの配列がC(h)を取る写真-1ではベーン下流の水路中央がSand Ridgeとなり、ベーンの配列がO(h)の写真-2では同位置でSand Troughとなることから、両者の河床高は逆位相の関係にあることがわかる。また、ベーンの配列がC(h)ではSand Ridgeの幅が流下に伴って狭くなるのに対して、ベーンの配列がO(h)ではSand Troughの幅が流下に伴って広がっている。このことは、前報⁴⁾の渦糸 τ およびC.R.SmithとS.P.Schwartz⁵⁾の水素気泡実験から、ベーンの配列がC(h)では水深スケールの縦渦が流下に從って接近し、ベーンの配列がO(h)では流下に從って離れたためであることが示唆される。ベーン周辺の局所洗掘については図-2のC(h)に較べてO(h)の方で大きくなることが分かる。写真-3および写真-4は、各々、ベーンの配列が図-2のV8C(h)およびV8O(h)に対応した河床形状を示したものであり、写真-3では水路中央が峰部となり、写真-4では同位置で谷部となることから分かる通り、両者の河床形状は逆位相である。図-3は、2枚のデルタベーンを流下方向に漸縮させ、その間隔がh(初期水深)から4hの間で変化させた場合の $x=40\text{cm}$ における河床形状を示したものである。ベーンの間隔がhおよび2hでは、水路中央 $y=0$ の近傍に顕著なSand Ridgeが、主流と平行に形成され、その波高は約5mmである。ベーン間の距離が3hおよび4hの場合、図より水路中央部にSand Troughとその両側に2本のSand Ridgeが生じていることがわかる。図-4は、2枚のデルタベーンを流下方向に漸拡させ、その間隔がh(初期水深)から4hの間で変化させた場合の $x=40\text{cm}$ における河床形状を示したものである。図よりベーン間隔がhおよび2hの場合には、ベーンの内側にSand Troughが形成されており、間隔が3hおよび4hでは、Sand Trough中央の $y=0$ の近傍に波高が2mmのSand Ridgeが見出せる。図-3および4から、ベーンの間隔が3hを越えるあたりから河床高の分布形状に変化が見られ、ベーンによって誘起された水深スケールの縦渦の相互作用が弱まることが考えられる。

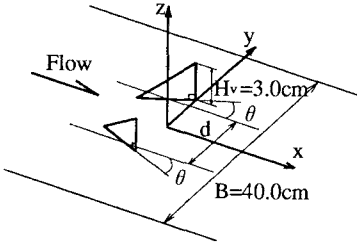


図-1 Delta Vaneの模式図

表-1 移動床実験

Case	水深 h(cm)	平均流速 U(cm/sec)	河床勾配 I ₀	迎角 tan θ	河床材料 d ₅₀ (mm)	Vaneの配列
1	4.28	41.1	1/500	1/7	0.94	C(h)
2	4.36	39.9	1/500	1/7	0.94	C(2h)
3	4.20	41.3	1/500	1/7	0.94	C(3h)
4	3.85	40.0	1/500	1/7	0.94	C(4h)
5	4.05	44.6	1/500	1/7	0.94	O(h)
6	4.16	42.4	1/500	1/7	0.94	O(2h)
7	4.09	43.6	1/500	1/7	0.94	O(3h)
8	3.98	39.2	1/500	1/7	0.94	O(4h)
9	3.90	40.4	1/500	1/7	0.94	V8C(h)
10	4.10	38.6	1/500	1/7	0.94	V8O(h)

表-2 固定床実験

Case	水深 h(cm)	平均流速 U(cm/sec)	河床勾配 I ₀	迎角 tan θ	Vaneの配列
11	4.0	45	1/500	0.176	C(nh),O(nh)
12	4.1	38.6	1/500	1/7	V8O(h)

写真-1 河床形状 C(h)

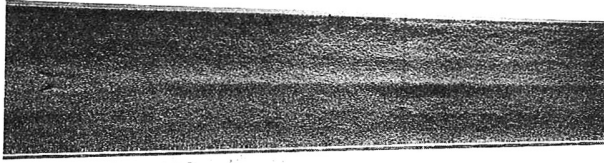


写真-2 河床形状 O(h)

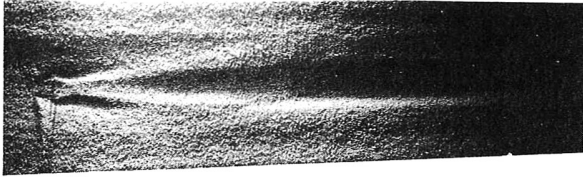


写真-3 河床形状 V8C(h)

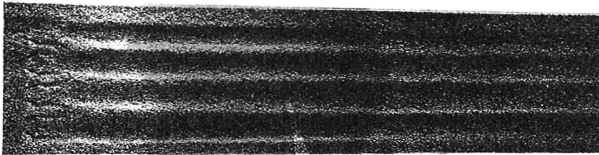


写真-4 河床形状 V8O(h)

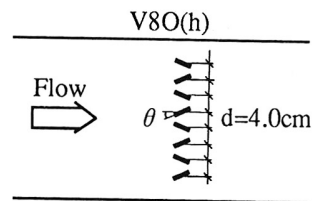
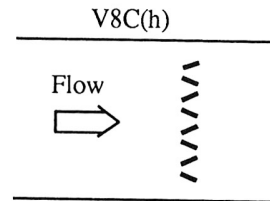
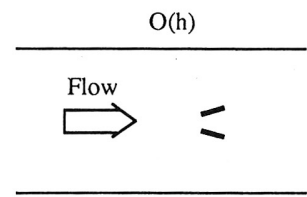
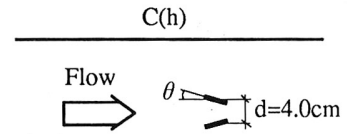
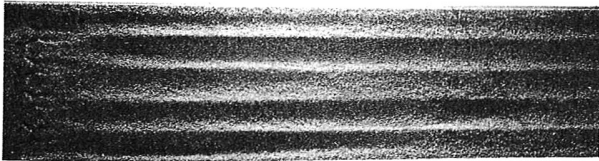


図-2 デルタベーンの配列

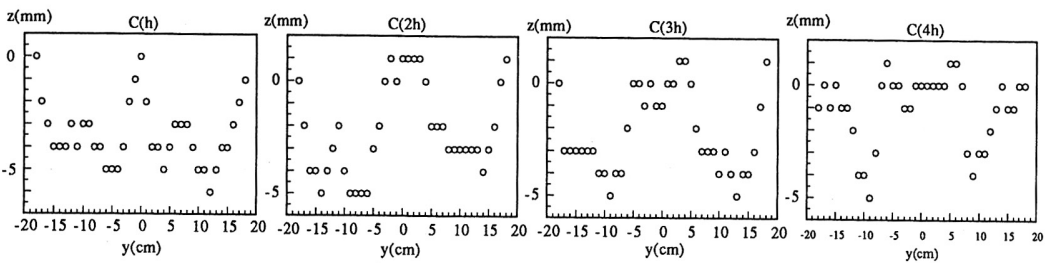


図-3 デルタベーンの間隔による河床形状の変化 (ベーン間隔が漸縮)

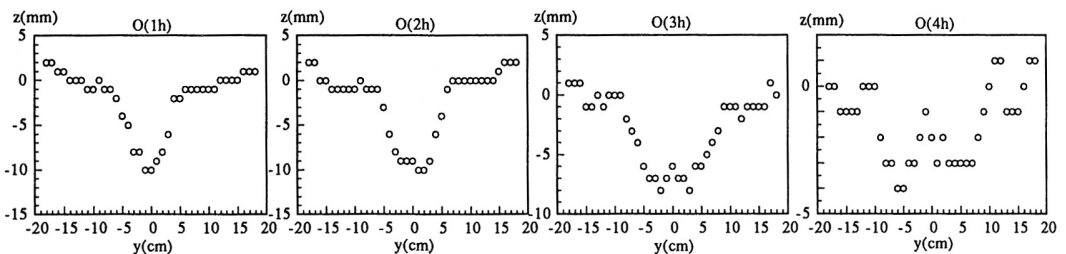


図-4 デルタベーンの間隔による河床形状の変化 (ベーン間隔が漸拡)

4. 流れの制御

4.1 ベーン周辺の流れ

写真-5から7は、コンデンスミルクを用いた色素流脈法によりベーン周辺の流れを可視化したものである。コンデンスミルクは、ベーン直上流の10cm付近の水路床に薄く塗布した。上流の壁面近傍にあるコンデンスミルクが進入せず路床が黒くなっている場所は、ベーン前面と後流域である。ベーン前面には円柱の場合に類似の馬蹄形渦の存在が考えられる。また、ベーンの配列がC(h)の写真-5では、ベーンを通過した色素は幅が流下方向に細く、白色は鮮明となっている。一方、ベーンの配列がO(h)の写真-6では、ベーンを通過した色素は幅が流下方向に拡がり、薄くなり拡散している。このことは、写真-1および2の河床形状とも対応しており、ベーンの配列がC(h)では、ベーン間の中央で上昇流となる互いに逆回転の一对の縦渦が存在し、ベーンの配列がO(h)では、ベーン間の中央で下降流となる互いに逆回転の一对の縦渦が存在していること、および一对の縦渦と路床との相互作用により、ベーンの配列がC(h)では、縦渦間の距離が接近し、ベーンの配列がO(h)では、縦渦間の距離が離れたことが考えられる。ベーンの配列がV8O(h)では、ベーンの下流域に四本の鮮明な筋が主流に平行に走っており、水路横断方向に水深スケールの縦渦が安定して存在していることが予想される。

写真-5 ベーン周辺の流れ C(h)

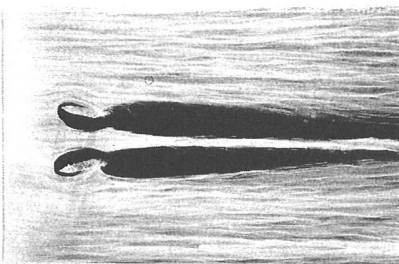


写真-6 ベーン周辺の流れ O(h)

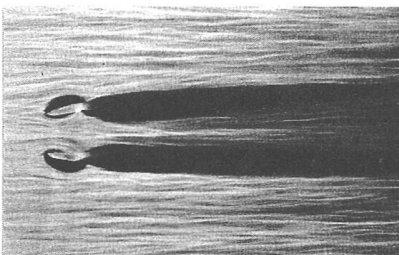
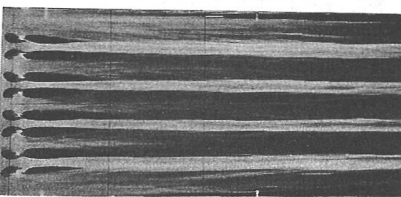


写真-7 ベーン周辺の流れ V8O(h)



4.2 主流速および二次流

図-5から8は、表-2のCase11に示された同一の水理条件で、二枚のデルタベーンを用い、その距離および向きを変えることによる主流速および二次流の変化を示したものである。図-5では、ベーンの位置は $y=\pm 2\text{cm}$ 位置にあり、水深スケールの縦渦の中心位置は $x=8\text{cm}$ と $x=20\text{cm}$ で大きな変化はなく、 $y=\pm 2\text{cm}$ 、 $z=\pm 2\text{cm}$ にある。写真-5および6においてコンデンスミルクが流入せず黒くなっているのは、下降流が生ずる場所であることがわかる。また、ベーンの配列がC(h)の方でO(h)に較べて二次流が強く現れており、 $x=8\text{cm}$ ではベーンの後流の影響により上昇流部が必ずしも主流速が小さくはなっていないが、 $x=20\text{cm}$ 位置では主流速は二次流の影響を受け、上昇流部で極小値、下降流部で極大値を取り、縦筋河床上の流速場に類似した分布形状⁹⁾となっていることがわかる。図-6から8より、水深スケールの縦渦の中心位置は、ベーンの設置位置に対応していること、およびいずれの縦渦も明瞭なセル状の形態を取っているもののベーンの間隔が広がるに従って二次流の強さが小さくなっており、縦渦間の相互作用が小さくなったために減衰したことが示唆される。

5. まとめ

水深スケールの縦渦は、せん断流れにおいては渦の強さは微弱であっても流れを三次元化し、減衰が僅かで主流方向に長い距離に互って持続する性質を持ち、平均流として存在するため横断方向への運動量や物質の輸送および生態系における役割は極めて大きい。本研究では河床に三角形の翼板を主流に対してある攻撃角をもって設置し、開水路流れに潜在する並列らせん流を引出し、流れと土砂輸送を制御することを目的に検討を行った。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

(1) 2枚のデルタベーン間の距離を流下方向に漸縮させた場合、ベーンの間隔が h および $2h$ では、ベーン間に1本の顕著なSand Ridgeが、主流と平行に形成され、ベーン間の距離が $3h$ および $4h$ の場合、

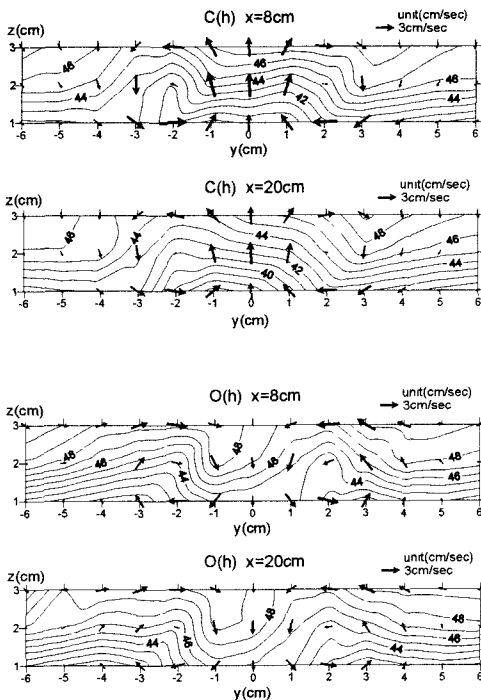


図-5 主流速の等値線と二次流ベクトル
(ベーン間隔が h の場合)

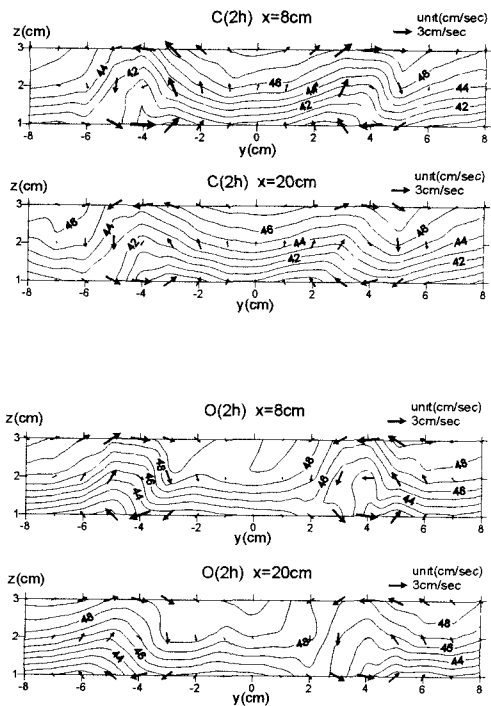


図-6 主流速の等値線と二次流ベクトル
(ベーン間隔が $2h$ の場合)

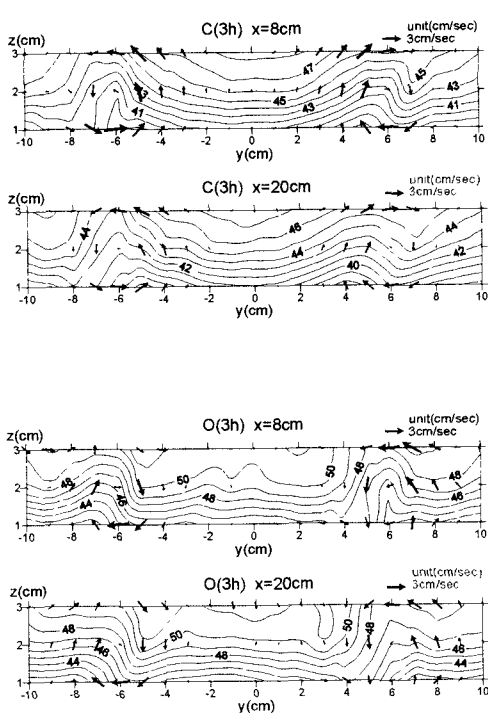


図-7 主流速の等値線と二次流ベクトル
(ベーン間隔が $3h$ の場合)

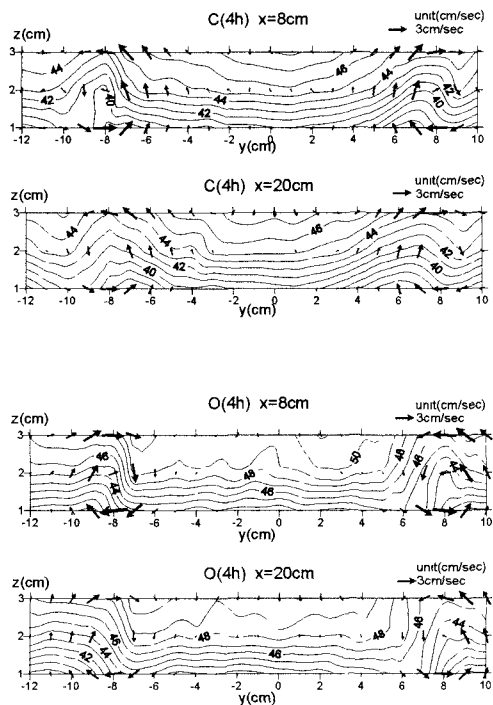


図-8 主流速の等値線と二次流ベクトル
(ベーン間隔が $4h$ の場合)

ベーン間にSand Trough とその両側に 2 本のSand Ridge が生じる。一方、2 枚のデルタベーン間の距離を流下方向に漸拡させた場合、ベーンの間隔が h および $2h$ では、ベーン間にSand Trough が、主流と平行に形成され、ベーン間の距離が $3h$ および $4h$ の場合、ベーン間の中央に 1 本のSand Ridge が生じる。ベーンの間隔が $3h$ を越えるあたりから河床高の分布形状に変化が見られ、ベーンによって誘起された水深スケールの縦渦間の相互作用が弱まることが示唆される。

(2) ベーン周辺の局所洗掘は小さく、ベーン配列が $O(h)$ で若干大きく現れたがベーンを組み合わせたことによりその大きさは軽減される。

(3) ベーンの配列が $C(h)$ では、ベーン間の中央で上昇流となる互いに逆回転の一对の縦渦が存在し、ベーンの配列が $O(h)$ では、ベーン間の中央で下降流となる互いに逆回転の一对の縦渦が存在していること、およびベーン直下流では一对の縦渦と路床との相互作用により、ベーンの配列が $C(h)$ では、縦渦間の距離が接近し、ベーンの配列が $O(h)$ では、縦渦間の距離が離れる。

(4) 水深スケールの縦渦の中心位置は、ベーンの設置位置に対応していること、ベーンの間隔が広がるに従って二次流の強さが小さくなっており、縦渦間の相互作用が小さくなったために減衰したことが示唆される。

(5) デルタベーンによって人工的に発生させた水深スケールの縦渦は、流れの可視化実験および点測定からベーンの間隔が水深で安定して存在することが示された。

本研究を遂行するにあたり、ウエスコ土木技術振興基金の助成を受け、熊本大学工学部学生山下竜雄君には熱心な協力を得た。記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) A.J.Odgaard and J.F.Kennedy :River-Bend Protection by Submerged Vanes , J. Hyd. Div., ASCE, Vol.109, HY8, pp.1164-1173, 1983
- 2) A.J.Odgaard and J.F.Kennedy :Prevention of Local Scouring at River-Bend by Iowa Vanes, JHHE, JSCE , Vol.2, No.1, pp.1-13, 1984
- 3) 福岡捷二、渡辺明英：ベーン工の設置された湾曲部の流れと河床形状の解析、土木学会論文集, No.447, II-19, pp.45-54, 1992
- 4) 大本照憲, 平野宗夫：縦渦列の安定機構とその制御について、水工学論文集, 第37巻, pp.495-502, 1993
- 5) C.R.Smith etc.:Observation of Streamwise Rotation in the Near-wall Region of a Turbulent Boundary Layer, Phys. Fluids Vol.26, No.3, pp.641-652, 1983
- 6) 大本照憲, 平野宗夫, M.S.Pallu：縦筋河床上の三次元乱流構造、第33回水理講演会論文集, pp.529-534, 1989