

高植生密度の葦河岸を有する水深の大きな水路における流れの特性

Flow properties found in a deep open experiment channel
with dense vegetation bank

長谷川和義* ・ 浅井 重政** ・ 金高 州吾*** ・ 馬場 仁志****

By Kazuyoshi HASEGAWA, Shigemasa ASAI, Shugo KANETAKA and Hitosi BABA

This paper presents the measurement results of turbulent velocity fields for flows in a deep open experiment channel with dense vegetation. The flows showed the strong 3-dimensional properties that the maximum flow directional velocity appears near the 1/3 water depth from the bottom and Reynolds stress become negative over the 2/3 water depth area. For the cause of the phenomena, transport of low velocity fluid by strong boils to go upward from the bottom near vegetation boundary was suggested from the distribution of turbulent flow energy.

Keywords: flow with dense vegetation bank, turbulent flow, velocity measurement
Reynolds stress

1. はじめに

河川環境改善の要請を背景に、植生をともなう河道水理に関する研究が大きく進展している。国内研究に関する詳細なレビューが、岡部⁽¹⁾、池田⁽²⁾、辻本⁽³⁾、渡邊⁽⁴⁾などによっておこなわれている。こうした研究によって植生河道水理の枠組みが明確になってきており、次の視点が重要になっているようである。

- ・ 植生帯が両岸にある場合、片側のみの場合、中央に存在する場合によって、河道の流れが大きく異なり、一般に分けて考える必要がある。これは植生帯境界で発生する水平渦の挙動が現象を支配することによっている。
- ・ 水理学的に分類した4種の植生（低草本類、高草本類、剛木本類、水草類）に対応して流れ場が変わる。特に、水没性の場と非水没性の場では次元の異なる流れ場が生ずる。
- ・ 植生帯幅、植生密度、透過係数、水路幅、水深などが、流れに対して重要な影響をあたえる。
- ・ 植生帯境界での横断混合が、境界せん断力や流砂移動現象に決定的な影響をもたらす。

このように、植生をともなう水理現象の多くは水平方向の現象が卓越しており、多くの研究も水平2次元流の観点から進められてきたものといえる。河道全体の流れをあつかう場合や、横断混合に支配される流速分布場・河床変動を考える場合には、現象が水深方向に一樣とみなす近似化は当然であろう。特に、植生が均質で密度のそれほど高くない場合の非水没流れに関しては、辻本らの実験⁽⁵⁾によってもその2次元性が確認されている。

しかし、密度の高い植生帯をもつ相対的に大きな水深の流れ場では、そうした2次元性は期待できないものと考えられ、特に、植生境界近傍の局所現象を問題にする際にはこのことを避けるわけにいかない。植生流れの3次元構造を調べた研究は非常に少なく、清水⁽⁶⁾ら、瀬津⁽⁷⁾らなど数値シミュレーション研究においてみられるのみである。

本研究は、河岸に葦などの直立性高草木を植えた際に、それらがどのような環境維持・向上効果をもたらすか、またいかなる護岸効果をもたらすかを明らかにしようとして始めたものであり、積極的に水深方向の流れの様子を調べようとしている。このため、水深0.8m 水面幅2mの大型実験水路を用いてその片側1mに葦を模した木棒を密に植え、横断面内の3次元方向平均流速・乱れ成分を詳細に測定してその特性を調べた。

*	正会員	工博	北海道大学工学部土木工学科	(060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
**	学生員		北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻	(060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
***	正会員		北海道開発局開発土木研究所	(062 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)
****	正会員		北海道開発局開発土木研究所河川研究室室長	(062 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

2. 実験概要

本実験は、北海道開発局開発土木研究所石狩水理実験場内にある幅 4 m、長さ 40 m のコンクリート製直線大型水路⁽⁶⁾ に火山灰土からなる河岸・河床を設けて、その中流部の側岸上に葦などを想定した木製の棒を模擬植生として植え付けて行われた。河床は移動床状態とし、上流端から流下方向に 6～7 m の地点には給砂を行うためのベルトコンベアを設置し、水路の下流端には流れを等流状態に調節するための可動堰を設けてある。実験水路の平面図と横断面の概略図と写真をそれぞれ図-1、図-2、写真-1 に示す。これ以後本文中で用いる y 軸および鉛直標高、a～k の添え字をつけた測線の位置などを図-2 中に示す。また、流下方向を x、鉛直方向を上向きに z とする。図に示すように、植生の区間は水路中流部の 16.1 m であり、植生領域幅は 1.2 m となっている。模擬植生の配置は、より現実に近い状態とするために、その座標を一様乱数で与え、琵琶湖での調査報告をもとに 1600 (本/m²) となるようにして予備実験 (case0) を行った。その後一年間養生の上で放置し、case0 で変化した河床を整えた後、以下の 2 ケースの植生密度を変化させた実験 (case1, case2) を行った。

case0 は case1 とほぼ同様な実験であり、著者ら⁽⁹⁾ によって報告されていることから、ここでは、case1, case2 について記述する。

また、各ケースともに流量 0.5 m³/sec、0.7 m³/sec の 2 種類の流量の通水を行ったが、ここでは護岸にとってより危険な状態を想定した 0.7 m³/sec の場合について記述する。その際の実験条件は表-1 に示す通りである。各ケースともに総通水時間は約 400 分間であり、200 分ごとに通水を一旦停止させ、水路の水を抜き、断面の測定を行った。

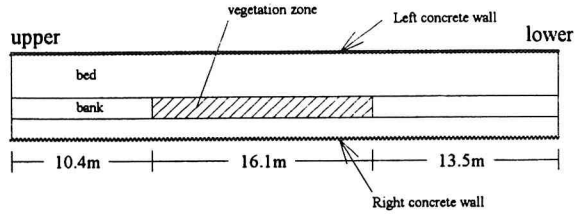


図-1 水路平面図

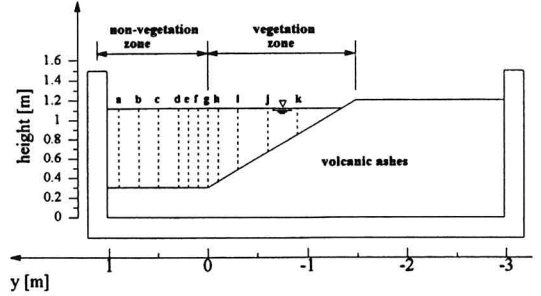


図-2 水路横断面図

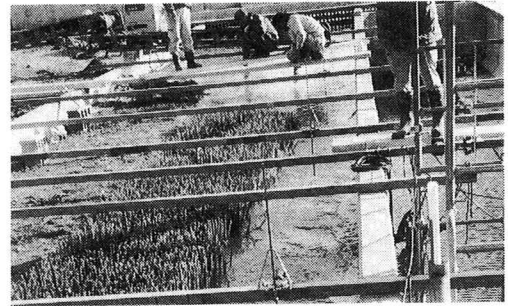


写真-1 実験水路

表-1 各ケースの実験条件

実験ケース	植生密度(本/m ²)	河床初期勾配	流量(m ³ /sec)	給砂量 (m ³ /sec)
case1	1600	1/1500	0.7	0.028
case2	1000	同上	同上	同上

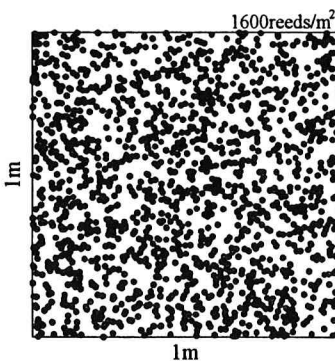


図-3 植生密度(1600 本/m²)

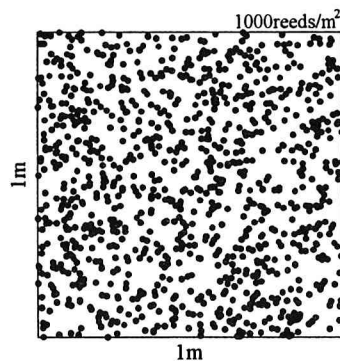


図-4 植生密度(1000 本/m²)

流水時の計測項目は水面勾配・水面変動・流速・浮遊砂採水であり、通水停止時の計測項目は河床横断、縦断形の測定である。それぞれの測定項目についての詳細事項を以下に示す。

(a) 水面勾配：水路上流端から 6、10、14、18、22、25、32 m に位置する 7 測線の左岸コンクリート壁から 50cm の地点において、通水時の前後と通水中に 30 分間隔で水位をポイントゲージによって計測し求めた。

(b) 水面変動：水路上流端から 4、12、16、24、36 m に位置する 5 測線の左岸コンクリート壁から 50cm の地点において、容量式波高計を用いて通水時に 0.5 秒間隔で計測した。

(c) 流速：水路上流端から 20 m に位置する測線で鉛直方向に 2～11 点、横断方向に a～k (図-2 参照) の 11 点、全約 100 点のそれぞれにおいて、3 次元電磁流速計を用いて 0.1 秒間隔で 60 秒間流下方向、横断方向、鉛直方向の流速を測定した。また、乱流計測の信頼性を高めるために流速計を架台に固定するとともに、振動と流れによる傾斜を抑制するように 3 方向から釣り用糸をリールで引いて先端部の固定をはかった。

(d) 浮遊砂採水：水路上流端から 19 m に位置する測線で鉛直方向に 6～9 点、横断方向に b、f、h、i、j (図-2 参照) の 5 点、全 41 点においてサイフォンによって採水した。

(e) 河床横断測定：通水停止時に水路上流端から 16、18、20、22、24 m に位置する 5 測線の河床横断を水準レベルと河床測定用スタッフを用いて測定した。

(f) 河床縦断測定：通水停止時に左岸コンクリート壁から 50cm 地点、1 m 地点の河床縦断を水準レベルと河床測定用スタッフを用いて測定した。

3. 実験結果

3.1 流れの概要

この実験は植生域が部分的に設けられているために、全体の流れは急縮、急拡を伴う不等流状態になっており、対応して河床、水面とも図-5 に示すような変則的縦断形状を示している。

流れの特徴は、多くの研究で指摘されているような水平渦が明瞭に発達せず、そのかわりに強いボイルが植生境界近傍、および非植生水路の中央近くから周期的に発生し、その表面での高速域側に斜めに伸びる広がり植生域側とその反対側に強い横断方向流れを生み出していることである。1 つのボイルが通過した後に、植生側から腕状の弱い引き出し流れが認められ、アルミ粉による可視化ではこれが水平渦のように回転することがある。この傾向は、case2 でより顕著であった。遅い流れに次のボイルが追いつき、腕の境界に多数の小渦を生み出す。case2 における目測では、100 個のボイル通過に 364 秒を要し、1 回の平均通過時間が 3.64 秒となっている。したがって、各ボイルが平均流速で流下した場合、1 個のボイル長は 3.2 m ほどになる。植生域の反対側に向かうボイルによる表面流れは、左岸コンクリート壁から 30～40cm の所で沈み込んでいるようであり、軽石の収れんが見られるが、この境界はボイル波長に合わせて波状にうねっている。

模造葦の揺動は顕著でなく、ボイルによる植生域への流れ込みが生ずるところでやや大きい。また、植生内の流れは極めてゆっくりしており、大部分の場所で表面の逆流が認められない。しかし、ボイルによる流れ込みが強い場所とそれが弱くむしろ引き出し流れの目立つ場所があり、このためアルミ粉の濃淡が 5 m ほどの周期をもって波状に分布する。ボイルは通過していくのに対し、この波形が一定して動かないことが注目された。

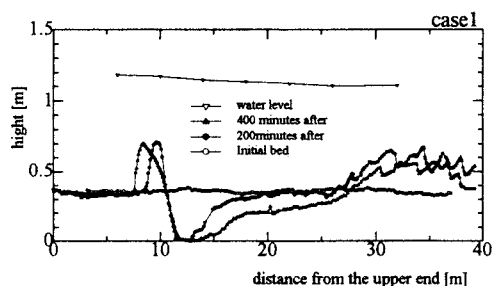


図-5 河床縦断形状

3.2 平均流速分布

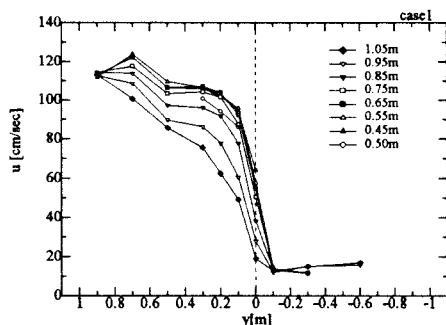


図-6 流下方向流速の水平分布 (case1)

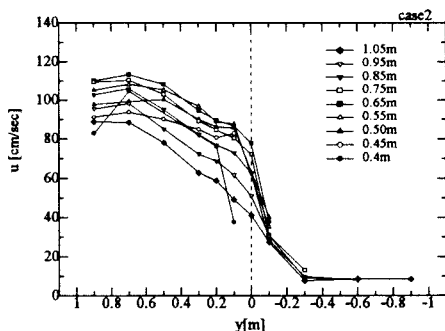


図-7 流下方向流速の水平分布 (case2)

図-6、図-7に各ケースの1回目の計測で得られた流下方向流速の横断分布を示す。図中右上の添え字は図-2に示した鉛直標高である。植生密度の違いによって、植生境界における du/dy の傾きと分布の変曲点の位置が異なっている。case1 では速度勾配がきつく変曲点が植生境界ないしはその外側に現れているのに対し、case2 ではこれより緩い速度勾配を示し、変曲点が植生内に入り込んでいる。また、植生境界から 20~30cm ほど非植生域側に離れたところで、分布が一旦水平となっていることが注目される。

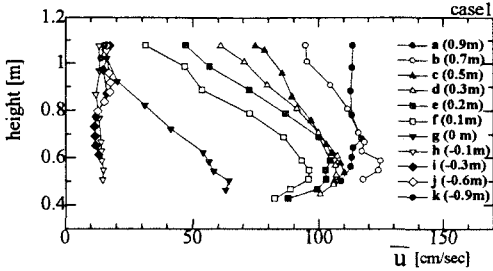


図-8 流下方向流速の鉛直分布 (case1)

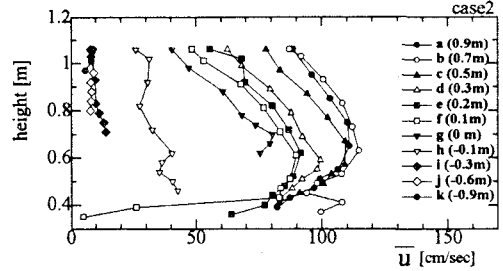


図-9 流下方向流速の鉛直分布 (case2)

図-8、図-9に流下方向流速の鉛直分布を示す。図中の右側にある添え字は、図-2に示した各測線位置を示している。図に示すように、植生域(測線 g~k)においては分布形が立っており、鉛直方向にも横断方向にもほぼ一様な分布になっていることがわかる。

一方、非植生域(測線 a~g)においてはどちらのケースも分布形が一般の対数分布から大きくはずれており、底から 20~30cm 程度の高さでピークとなる特異な分布をしている。また、その傾向は植生境界に測線が近づくほど強まっている。2 ケースの違いを見ると、植生密度が高い case1 の分布形が、case2 よりもさらに強い傾きをもって寝ている。

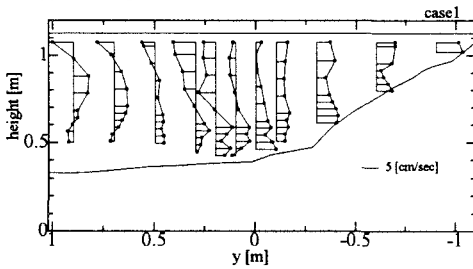


図-10 横断方向流速分布 (case1)

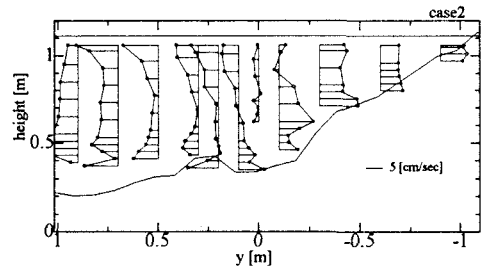


図-11 横断方向流速分布 (case2)

図-10、図-11に両ケースの横断方向流速の分布図を示す。どちらのケースも非常に複雑な流況を示し、明瞭な2次流線を描くことができない。case1 は、全体として左岸から右岸に向かう流れが卓越して現れているもどで非植生域水面に左岸向きの強い流れが認められ、一部らせん流が生じている。一方、case2 では植生境界でらせん流が認められるものの、その左右で発散流れが生じている。こうした流れは非常に強いボイルと関係しているものと見られ、計測時間の不足もあって安定した構造を見出すに至っていない。

3.3 レイノルズ応力

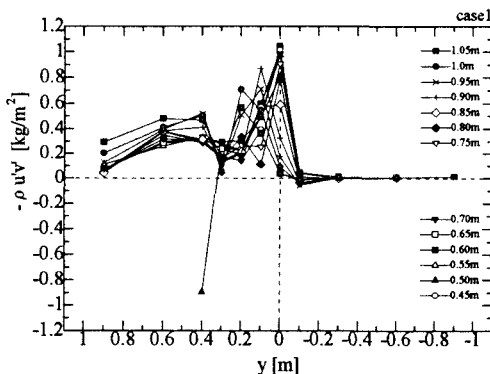


図-12 レイノルズ応力分布 (case1)

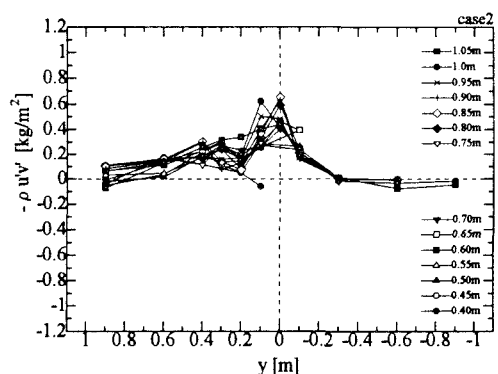


図-13 レイノルズ応力分布 (case2)

図-12、図-13 に、各ケースの主流および横断方向流速の時間変動成分によるレイノルズ応力 ($-\rho \overline{u'v'}$) の水平分布を示す。図中右側の数字は、図中のマークと高さとの対応を示している。これらの図が示すように、いずれのケースにおいても鉛直標高約 80cm の高さまではピークが植生境界上に現れるが、それ以上水面に近づくともピークが植生境界よりも非植生域側にずれることがわかる。また、y 軸方向の変化を見ると、植生境界から 20cm～30cm 非植生域側で一旦落ち込みをしたあとに再び増加する傾向が見られる。このことと、図-6、図-7 の流下方向流速の水平分布と対応しており、レイノルズ応力が下がる地点では流速分布の du/dy が小さくなっている。

次に、図-14、図-15 に各ケースの主流と鉛直方向流速の時間変動成分によるレイノルズ応力 ($-\rho \overline{u'w'}$) の鉛直分布を示す。図中右側の文字と数字は y 軸方向の測線と位置を示す。両ケースとも 50cm～60cm の鉛直標高で+から-へ転じており、この高さで流下方向流速がピークとなり、これより上で du/dz が負になっていることと直接的に対応している。移動床実験のために底面近傍の計測が非常に難しく、底から、数 cm の区間の計測が不能であったために底面にごく近い点の値が得られていないが、大きめの正值をとることが予想される。

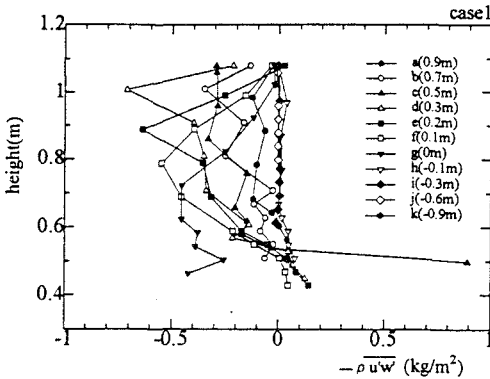


図-14 レイノルズ応力分布 (case1)

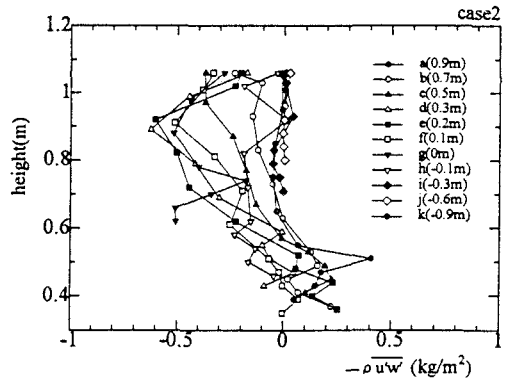


図-15 レイノルズ応力分布 (case2)

3.4 乱れエネルギー

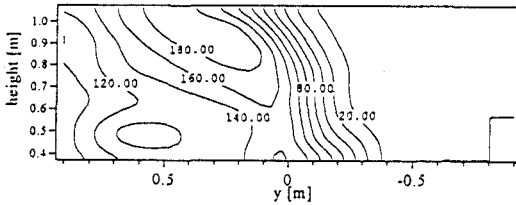


図-16 乱れエネルギーコンター図 (case1)

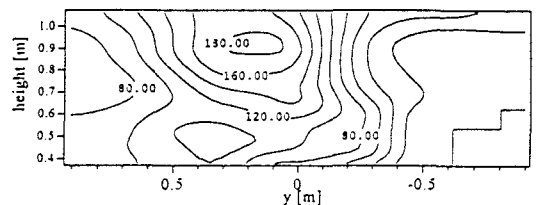


図-17 乱れエネルギーコンター図 (case2)

乱れエネルギー k の横断面内分布をコンターによって図-16、図-17 に示す。case1 に顕著に見られる底面から左岸水面方向に向かう嶺線は、植生境界の根本付近から発生し、水面に向かうボイルの存在を示唆している。

一方、case2 における case1 と同様な嶺線は、植生境界の底から水深 1/3 の点あたりから発生している。両ケースにおけるこの相違は、植生密度の違いがもたらす流下方向流速の水平分布の変曲点位置の違いに対応しているものと推定される。

4. 流体力の釣り合い

非植生域における流下方向の流体力の釣り合いを考えるにあたって、次式を考える。

$$-\rho \int_{\zeta}^H (\overline{u'v'})_{y=0} dz = \rho g A I_m + \rho \int_{\zeta}^H (\overline{u'v'})_{y=0} dz + \rho \int_0^B (\overline{u'w'})_{z=\zeta} dy$$

ここで、 H : 水位、 ζ : 河床の高さ、 A : 非植生域の流積、 $I_m = -\frac{\partial}{\partial x} \left(H + \beta \frac{U^2}{2g} \right)$: 運動量勾配、 B : 非植生域

の水路幅、 β : 運動量補正係数、 U : 断面平均流速である。

底面剪断力が計測できなかったことから右辺第 3 項を除き、他の各項の実測値を代入して底面剪断力を評価す

る。これから抵抗係数を算出した結果を表-2に示す。算出された抵抗係数は、いずれも本実験に先駆けて同様な河床材料、河床断面で行われた裸地河岸浸食実験⁽⁶⁾における値にほぼ等しい($C_f \approx 0.01$)。したがって、間接ながら今回得られた各項の値は妥当なものと判断され、植生によって引き起こされる側面レイノルズ応力、2次流による運動量輸送および底面剪断力の全流下力に対する割合は、ほぼ表中のパーセンテージになるものと考えられる。植生密度の小さな case2 において側面レイノルズ応力が大きくなるのは、やはり混合の起こりやすさからもたらされたものであろう。

表-2 流下方向流体力の力の釣り合い (単位 kgf/m)

ケース	$\rho g A I_m$	$\rho \int_{\zeta}^H (\bar{u} \bar{v})_{y=0} dz$	$-\rho \int_{\zeta}^H (\bar{u}' \bar{v}')_{y=0} dz$	河床の抵抗	河床抵抗係数 C_f
case1	2.28	-0.79(35%)	-0.40(17%)	-1.09(48%)	0.0122
case2	1.82	-0.480(27%)	-0.371(20%)	-2.237(53%)	0.0119

5. 考察とまとめ

- (1) 密度の大きな植生河岸を有する相対水深の大きな水路の流れ場では水平渦の卓越が認められず、周期的な強いボイルの発生が顕著に見られる。このボイルによって強い横断方向流が生じ、様々な特徴的な現象を引き起こす。
- (2) 流れの3次元性が強く、主流速の最大点が河床近くまで下がっている。これは植生域の遅い流体塊が水面近傍で引き出されることによって生ずるのではなく、ボイルによって植生域底面近傍の流体塊が運ばれることから生ずるようである。瀬津ら⁽⁷⁾の3次元シュミレーションにおいても、植生密度の高いケースで最大流速点の低下が現れている。
- (3) 非植生域の主流速横断分布においてくびれが現れている。清水ら⁽⁶⁾のシュミレーションによれば、2次流を考慮したモデルの場合に横断面内に2次流セルが生じ、その上昇域で同様なくびれが現れている。したがって、このくびれの現象もボイルの強い湧昇によってもたらされているものと判断される。
- (4) 同様な影響は、側方レイノルズ応力の分布にも現れており、非植生域において波打ちが認められる。
- (5) 乱れエネルギーの分布はボイルの上昇に沿う形で現れており、水面近傍で最大となる。また、植生密度の違いによってボイルの発生点が異なる。
- (6) 流れに対する抵抗は、植生境界での側方レイノルズ応力、2次流による運動量輸送、底面剪断力の順に大きくなっている。側方レイノルズ応力は case2 の方が大きい。混合の生じやすさが起因しているものと判断される。

参考文献

- 1) 岡部健士：河川の植生と河道特性,3.1.3.2,河川環境管理財団・河川環境総合研究所,資料第1号,pp.61-78,1995.
- 2) 池田裕一：河川の植生と河道特性,3.3.3.4,河川環境管理財団・河川環境総合研究所,資料第1号,pp.79-100,1995.
- 3) 辻本哲郎：植生を伴う流れの水理,1991年度(第27回)水工学に関する夏期研修会講義集Aコース,pp.A-5-1~A-5-22,1991.
- 4) 渡邊康玄：樹木と水理,1995年度(第31回)水工学に関する夏期研修会講義集Aコース,pp.A-9-1~A-9-19,1995.
- 5) 辻本哲郎・北村忠紀：側岸部に植生群落を有する開水路流れの横断混合機構に関する実験的研究,土木学会論文集,No.491 II-27,pp.61-70,1994.
- 6) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：水路横断面内に植生帯を伴う流れ場の数値計算,水工学論文集,第36巻,pp.265-272,1992.
- 7) 瀬津家久・Dan Naot・中川博次：植生を有する開水路流れの3次元流速分布に関する数値シミュレーション,水工学論文集,第39巻,pp.507-512,1995.
- 8) 金高州吾・渡邊康玄・長谷川和義・亀田祐二：大型火山灰流路を用いた側岸浸食実験、水工学論文集,第37巻,pp.631-636,1993.
- 9) 浅井重政・長谷川和義・渡邊康玄・金高州吾：ヨシを有する河岸の浸食・堆積に関する大型水路実験,土木学会北海道支部 論文報告集,第52号(B),pp.194-199,1996