

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

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現象を水面変動、流速変動の相互相関構造の実験的検討から調べた。さらに、植生域、非植生域をそれぞれ別々に1次元化し両流路の相互作用を交番する横流出入流速で代表させた解析から、こうした相関構造の水理学的解釈を試みるとともに、低周波変動による横断混合が付加抵抗を生じさせる過程の説明を試みた。

Key Words : flow with vegetation, transverse mixing, water-surface fluctuation, organized motion, hydraulic analysis

1. 緒言

近年、治水・利水に加えて河川環境機能の重要性が認識されるようになり、河川をなるべく自然に近い状態のまま整備しようとする機運が高まりつつある。河川に存在する植生は洪水時の流水抵抗を増大させるため従来は排除される傾向にあった。しかしながら、こうした植生繁茂域は大小様々な生物の重要な生息域であるのみならず、情緒あふれる河川空間創造のために欠くべからざるものであり、これからはむやみやたらに植生を伐採するのではなく適切に植生の繁茂状態を制御しつつ、河川整備を行うことが指向されている。また特に側岸部に存在する植生群落は周辺の流速を低減させ水制効果をも期待されるなど、植生の存在をうまく生かした河川整備のための河川植生を伴う流れの水理現象に関する研究が活発に行われるようになった^{1), 2)}。

河川における植生の繁茂状態は多様で複雑であるが、例えば Fig.1 に示される辻本ら^{3), 4)} による手取川河川敷での植生群落調査の結果からもわかるように植生群落は河川の微地形と密接な関係を持ち、特にカワヤナギやヨシといった植生は流路の側岸に沿って縦断方向に長い群落を形成している。このような側岸部に存在する植生群落を伴う流れでは、植生群落内の遅い流れと植生群落外の早い流れが干渉する横断方向のせん断流場となり、植生群落内外での強い横断混合が生じる。横断混合は運動量の横断方向フラックスのみならず掃流砂、浮遊砂、浮遊物質等の横断方向フラックスを規定するのでこの機構を知ることは重要である。

側岸部に植生群落を有する流れを模擬して水路片側に植生群落を模擬した円柱群や多孔体を配した実験において、移流される組織的な(低周波の)水面変動・流速変動が観察され、これがこうした流路での横断混合に大きな役割を果たしているだろうことが指摘されている(藤田ら⁵⁾、辻本ら^{6)~8)}、池田ら^{10), 11)}、石川ら¹²⁾)。池田ら¹⁰⁾ は横断方向のせん断流の流速分布が持つ不安定性により周期(組織的)変動が出現するものと考え、植生存在による横断流速分布を表現することから不安定解析を行ない、最大発達を示す擾乱の周期と実測された低周波変動の周期が一致することを示した。Chuら¹³⁾ はより一般的な横断方向のせん断流場の不安定性を粗度の効果まで含めて検討し、条件によっては流れが不安定となることを示している。一方、辻本ら^{7), 8)} は植生域・非植生域をそれぞれ1次元化し、その間の流量・運動量の交換を考慮した水理モデルから水面変動を取り込んだ閉鎖系の不安定性として低周波変動出現の説明を試みている。

こうした場での時間平均された平均流特性については、水平せん断流としての取り扱いから運動量の横断方向フラックスを勾配拡散型で表し渦動粘性係数を横断方向に一定とした解析が池田ら^{10), 11)}、山崎ら¹⁴⁾ により行なわれ、さらに清水ら¹⁵⁾ は植生による形状抵抗を付加した代数応力モデルの適用性を検討している。これらはいずれも有益な知見を与えるものであるが、混合現象の中身を充分に把握したうでの活用が望ましい。

本論文では、まず Fig.2 に示すような矩形断面直線水路の片側に一樣な植生群落モデル(円柱群)を配置するという理想化された条件のもとでの実験から、植生群落を伴う流れが十分に発達した領域での流れの横断混合機構について調べた。とくに側岸部に植生帯を有する開水路流れにおいて観察される低周波の水面変動が横断混合に果たす役割を詳細に検討するため、水面変動、植生境

注1) 本論文の一部は第36回水理講演会で発表済であるが、その後実験、考察、解析を発展させて取りまとめた。

* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部環境地球工学教室

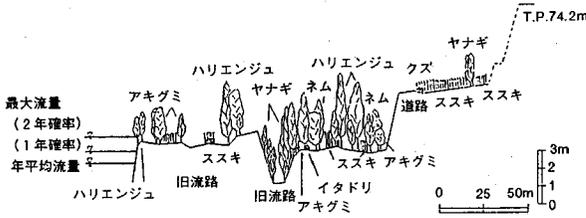


Fig. 1 Transverse change of bed elevation and vegetations covering the bed in Tedori-river (from Tsujimoto et al.4)

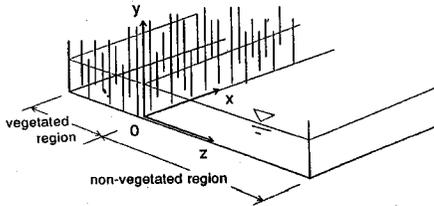


Fig. 2 Schematic illustrations of open-channel with vegetation

界近傍での横断方向流速、混合域での主流速変動の相互相関 (各量の相互相関及び空間的相互相関) を詳しく検討できるように計測を工夫した。なお、流れの3次元性が顕著となるのを避けるため、水位は植生高さ以下の流れを対象とした。次に、植生域と非植生域のそれぞれを1次元的に扱える領域とした解析からこうした相関構造の物理学的な現象の解釈を試みた。

2. 実験方法

実験は長さ12m、幅40cm (水路a: 金沢大学) 及び長さ12m、幅50cm (水路b: 京都大学) の矩形断面可変勾配式直線水路に5種類の植生群落モデルを水路片側に一定幅 (B_s) で縦断方向に5~7.5mの長さにわたって設置し、流れが充分に発達して縦断方向に変化しなくなった区間において流速・水面変動を測定した (Fig.2参照)。

植生群落モデルはいずれも円柱群で、(A) 直径(D)が1.5mmの竹製円柱を中心間隔(s)2.82cmで正方形の配置としたもの、(B) 中心間隔を2cmとしたもの、

(C) 直径0.2mmの塩化ビニール樹脂棒を1cm間隔で1箇所4本ずつ植え付けたもの、(D) 直径1mmの塩化ビニール樹脂棒を1cm間隔で植え付けたもの、

(E) 直径2.5mmの竹製円柱を間隔2cmで配置したものの5種類である。植生群落モデルの高さはモデルA~Dについては約5cm、モデルEについては約10cmである。それぞれの植生群落モデルについて透水試験^{注2)}を行ったところ透過係数 ($K_s = U_{0.1} I^{-1.2}$; $U_{0.1}$: 固有浸透流

Table 1 Properties of model vegetation

model	quality of material	diameter D (cm)	height K (cm)	spacing s (cm)	number of cylinder at one point	K_s (cm/s)
A	bamboo	0.15	4.6	2.8	1	295
B	bamboo	0.15	4.6	2.0	1	234
C	vinyl chloride	0.02	5.0	1.0	4	120
D	6-6 nylon	0.1	4.1	1.0	1	137
E	bamboo	0.25	10.0	2.0	1	172

Table 2 Experimental condition

RUN	Flumc	B_s (cm)	l_b ($\times 10^3$)	h_0 (cm)	U_{ave} (cm/s)	U_k (cm/s)	C_f ($\times 10^{-3}$)	Ω	measurment [#]
A1	a	12	1.70	4.57	32.0	20.1	3.8	0.050	P,E
B1	a	12	1.70	4.28	27.6	16.3	4.0	0.116	P,E
B2	a	12	1.74	3.22	23.7	14.1	4.5	0.087	P
B3	a	12	2.68	4.15	35.1	18.5	3.6	0.112	P,E
B4	a	6	1.64	4.23	33.9	14.4	3.5	0.114	P,E
C1	a	12	1.65	4.38	22.0	10.5	5.2	0.298	P,E
D1	b	25	1.49	3.65	20.3	13.5	3.1	0.183	H
D2	b	25	2.50	3.82	24.2	16.1	4.2	0.191	H
D3	b	25	3.87	3.87	27.8	16.8	3.4	0.194	H
E1	b	25	10.0	4.10	39.0	28.0	9.1	0.136	H

#F: micro-propeller currentmeter
E: Electromagnetic anemometer
H: hot film anemometer

速, I_0 : エネルギー勾配) は100~300cm/sである。植生群落モデルの仕様について Table 1 に示す。

実験は水位が植生高さを越えない範囲で行なった。実験条件は Table 2 に示すとおりである。Table 2 において、 l_b : 路床勾配, h_0 : 平均水深, U_{ave} : 断面平均流速, U_k : 植生境界流速, C_f : 非植生域での底面粗度による摩擦損失係数, Ω : 植生密度を表すパラメタ ($= 0.5C_D \lambda h_0$; C_D : 植生の抗力係数, λ : 単位体積当たりの植生の遮蔽面積) である。植生群落モデルA~Dを用いたケースについては路床を滑面 (アクリル樹脂板), モデルEを用いたケースについては路床を粗面 (直径0.8mmの均一砂をニス付けしたもの) とした。なおモデルEを用いたケースでは詳細な相関構造については検討せず、流速のみの測定である。また植生群落モデルA~Cは水路aに、D, Eは水路bにそれぞれ設置された。

植生群落モデルA~Cを用いたケースでは、直径3mmの超小型プロベラ流速計 (篠塚製作所製: SV-3) を用いた主流方向流速の測定及びI型プローブ (直径8mm, 長さ3cm) の小型電磁流速計 (KENEK社製: VM-201H) を用いた主流方向流速、横断方向流速の同時測定を行なった。モデルD, Eを用いたケースでは2成分Hot-Film流速計 (Kanomax社製) を用いた主流方向流速、横断方向流速の同時測定を行なった。さらに、いずれのケースも容量式波高計 (KENEK社製: CH-403) を用いて水面変動を測定し、必要に応じて流速変動との同時計測とした。各計測器からの出力はHot-Film流速計については200Hz, 8196個、その他の計測器については

注2) 植生モデルを水路全幅にわたって設置し非水没状態では通水すると、ほぼ一様な流速分布が得られ、これを固有浸透流速と定義している⁽¹⁰⁾。

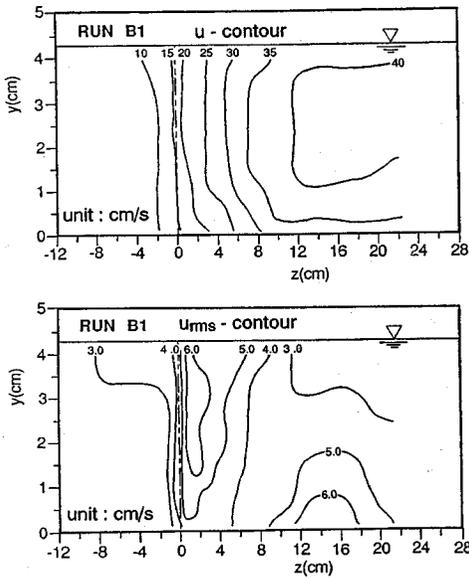


Fig.3 Contour of mean primary velocity, turbulence intensities in longitudinal direction

20Hz, 1024 個のサンプリングとし, A/D 変換機能付きのデータレコーダ (TEAC 社製: DR-F1) によって, フロッピーディスクに記録され, 必要な統計処理が施された。プロベラ流速計, Hot-Film 流速計での測定は水平面上の測点につき鉛直方向に 5~10 点で測定を行ったが, 電磁流速計では水面・路床の影響を考慮して路床から 2cm の高さでのみ測定した。

3. 実験結果の概要^{注3)}

Fig.3は測定された平均流速 u , 乱れ強度 u_{rms} の断面内分布をコンター表示した例である。植生境界付近ではコンターはほぼ鉛直軸に平行であることから, 水平面で2次元な現象であることが示唆される。これらの量について水深平均をとり, その横断方向分布の例をFig.4に示した。電磁流速計については鉛直方向に位置を変えた計測を行っていないので, 便宜的に路床から2cmの位置での結果をそのままプロベラ流速計による水深平均結果と併示した。主流方向についての結果を比較すると電磁流速計の結果から推定される特性は近似的に水深平均値の示す特性と一致しており, 本論文では以後断らない限りこれらのいずれも水深平均値の特性を示すものとして取り扱う。主流速は植生域と非植生域の境界付近で大きな速度勾配を持ち, この領域で乱れ強度, Reynolds 応力

注3) 本論文では実験結果についてそれぞれ数例が示されているが, より多くのケースについての結果は文献17)を参照されたい。

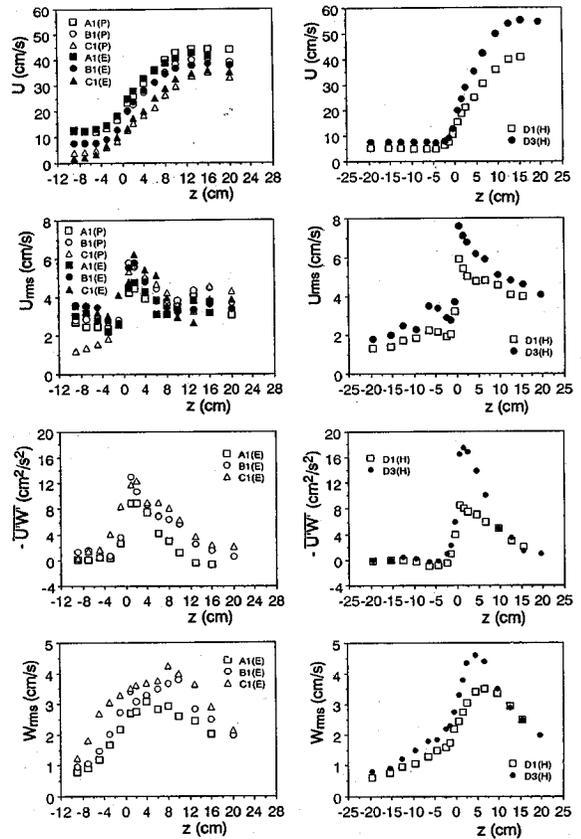


Fig.4 Transverse distributions of mean primary velocity, turbulence intensities in longitudinal and transverse directions, and Reynolds stress in transverse direction

が大きな値をとっている。

4. 水面変動の性質

まず Fig.5 に示すように横断方向に位置を変えた 2 台の波高計による同時計測を行い, その時系列 (h/h_{rms} と規準化してある, h_{rms} : 水面変動の標準偏差) の例を Fig.6 に示した。図より水面変動は低周波で規則正しく, 横断方向にはほぼ同位相であることがわかる。Fig.7 は水面変動の標準偏差の横断方向分布を示したものであるが, 水面変動の最大振幅は植生境界あるいはそれより若干非植生側に現れ, 両領域側に低減するが非植生域側の低減率が小さく境界近傍では非植生域側で水面変動が大きい。

Fig.8 は水面変動の自己相関係数を FFT 法により計算して示したものであるが, 図より変動の卓越周期 (T) は本実験の範囲では 2~4 秒程度である。Fig.8 には植生境界付近 ($z=1\text{cm}$) で縦断方向に位置を変えた数台の

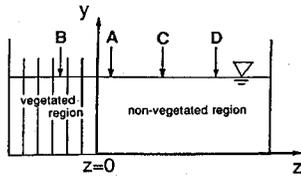


Fig. 5 Setup of limnimeters

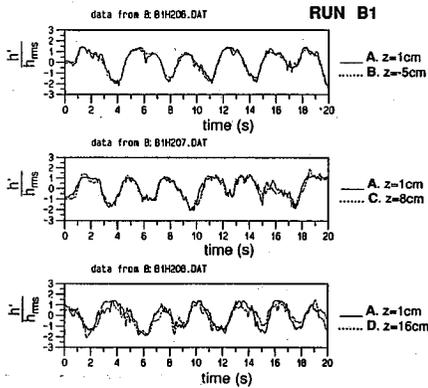


Fig. 6 Time series of water-surface fluctuation

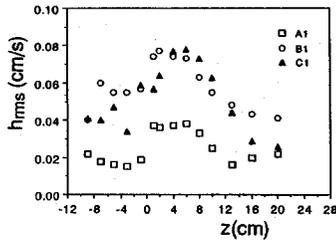


Fig. 7 Transverse change of standard deviation of water-surface fluctuation

波高計での同時計測 (Fig. 9 参照) に基づく相互相関係数も示してあるが、これより水面変動が形、大きさをほとんど変えずに伝播していることが認められる。測定位置の縦断距離間隔 (ξ) と相互相関係数のサブピークが示す遅れ時間 (τ_p) の関係を示したのが Fig. 10 で、図より変動の伝播速度 ($c \equiv d\xi/d\tau_p$) が求められ、これは Fig. 11 に示すようにほぼ混合域での平均流速 ($U_{mix} \equiv (U_m b_m + U_b b_b)/(b_m + b_b)$) ; ここで、 U_m , U_b : それぞれ非植生域、植生域の混合領域での平均流速、 b_m , b_b : それぞれ非植生域、植生域の混合領域幅である) と一致し、波動^{注4)}ではなく移流としての性質が確認された。

水面変動に関するいくつかの性質を Table 3 にまとめた。表中、 T : 卓越周期、 c : 移流速度、 L : 卓越波長である。

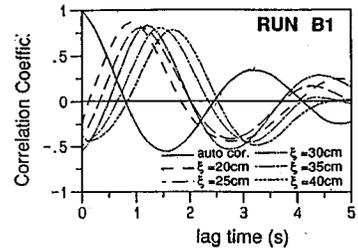


Fig. 8 Correlation coefficient of water-surface fluctuation

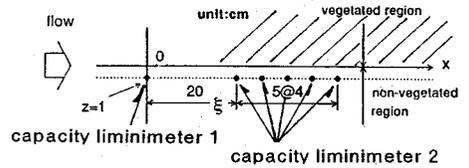


Fig. 9 Longitudinally simultaneous measurements

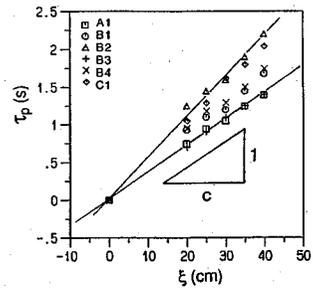


Fig. 10 Relation between τ_p and ξ

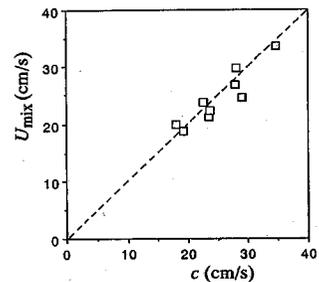


Fig. 11 Celerity of water-surface fluctuation

Table 3 Properties of water-surface fluctuation

Run	T (s)	c (cm/s)	L (cm)	h _{rms} (cm) at z=1cm	U _{mix} (cm/s)
A1	2.7	27.8	75.1	0.037	26.9
B1	3.1	23.6	73.2	0.074	22.4
B2	3.2	17.9	57.3	0.024	19.9
B3	2.5	28.0	70.0	0.111	28.7
B4	2.9	22.5	65.3	0.058	23.8
C1	3.7	19.2	71.0	0.064	18.8
D1	3.3	23.5	76.6	-	21.2
D2	2.5	29.0	73.7	-	24.5
D3	1.9	34.6	65.0	0.170	33.5

注4) ここでいう波動とは媒質の速度と波の伝播速度が著しく異なるものという認識で用いている。

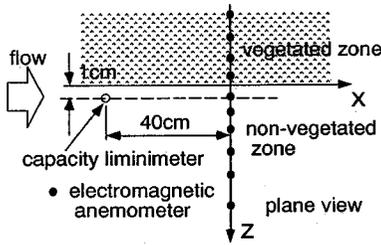


Fig. 12 Setup of limnimeter and currentmeter

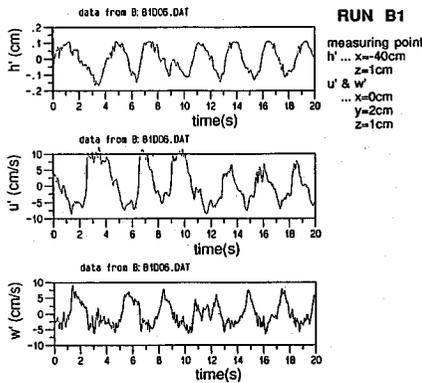


Fig. 13 Simultaneous measurements of velocity and water-surface

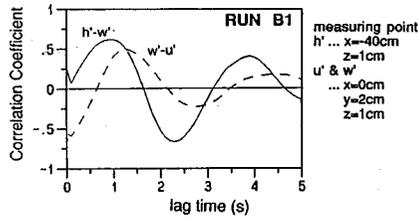


Fig. 14 Correlation coefficient of velocity and water-surface fluctuation

5. 水面変動と流速変動の相関構造

こうした水面変動が横断混合に重要な役割を果たしているものと予想されることから、Fig.12に示すように水路に波高計、電磁流速計を設置し、水面変動・流速変動の同時計測を行った。ただし同時計測時の電磁流速計及び Hot-Film 流速計の鉛直位置はそれぞれ路床から 2cm 上方、平均水面から 5mm 下方である。

同時計測された流速変動、水面変動の時系列の例を Fig.13 に示す。図より流速変動は水面変動と同様に低周波で比較的規則正しいことがわかる。これらの相互相関係数は Fig.14 に示されるように卓越する低周波変動に対して極めて高い値を示す。相互相関係数が示すサブピー

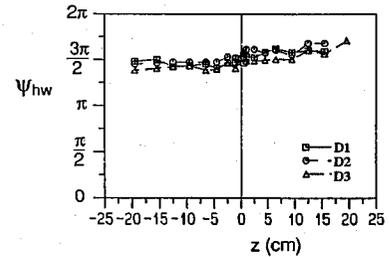
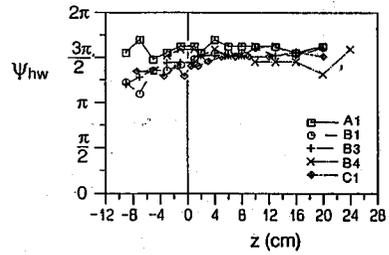


Fig. 15 Phase shift of $w'(t)$ to $h'(t)$

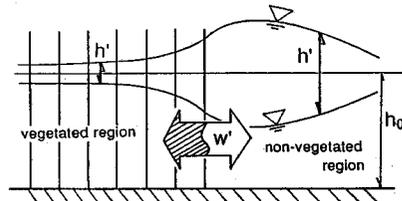


Fig. 16 Expected correlation between h' and w'

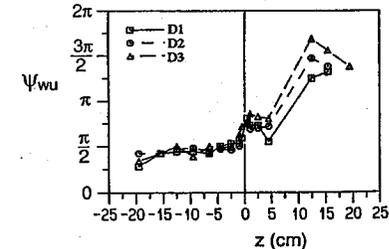
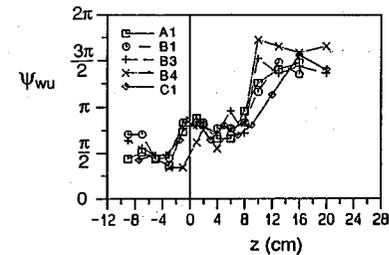


Fig. 17 Phase shift of $u'(t)$ to $w'(t)$

クから遅れ時間を求め、水面変動の移流性を考慮して同一断面における水面変動と横断方向流速変動の位相差

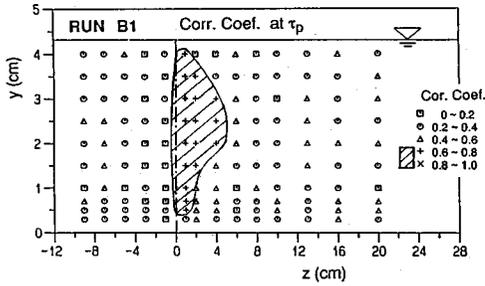


Fig. 18 Cross-sectional distribution of peak value of cross-correlation coefficient between $u'(t)$ and $h'(t)$

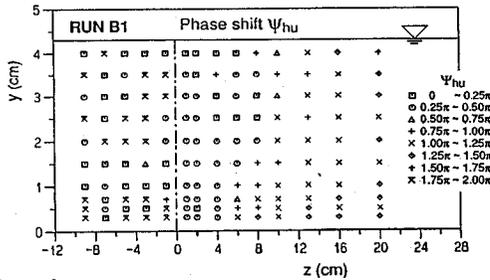


Fig. 19 Cross-sectional distribution of phase shift of $u'(t)$ to $h'(t)$

(時間軸上における水面変動に対する横断方向流速変動の位相遅れ, ψ_{hw}) を求め、その横断方向変化を示したのが Fig. 15 である。植生域側で第 3 象限、非植生域側で第 4 象限に若干ずれるようであるが概ね $3\pi/2$ である。これは水面変動と相関して横断方向流速変動が出現していることを示すものである (Fig. 16)。

同様に横断方向流速変動に対する主流方向流速変動の位相遅れ (ψ_{wu}) を求め、その横断方向分布を Fig. 17 に示す。植生域では概ね $\pi/2$ 、非植生域では概ね $3\pi/2$ となるが、混合域ではその間で連続的に変化し境界近傍では π 程度になっている。すなわち、 U' 、 W' は高い負の相関を示し強い運動量混合を意味している。

次にプロベラ流速計と波高計を同一断面内に設置し、水面変動と各鉛直位置ごとの流速変動 (u') の同時計測を行い、その相関構造を調べた。Fig. 18 は相関係数のサブピークの値の断面内分布で、植生境界近傍で高い値を示しており、このゾーンが混合領域といつてよいだろう。これは主流速の横断速度勾配の大きい領域、水面変動の振幅の大きい領域と対応している。

Fig. 19 は水面変動に対する流速変動の位相差 (ψ_{wu}) の断面内分布を調べたもので、混合域では水深方向に大きく変化することはなく、これは水深方向に一体となった混合 (流体塊の出入り) が行われていることを意味している。すなわち明確なセルの形成は認められず、横断混

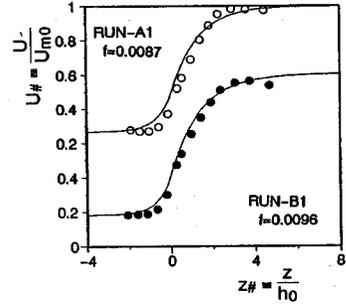


Fig. 20 Transverse distribution of u

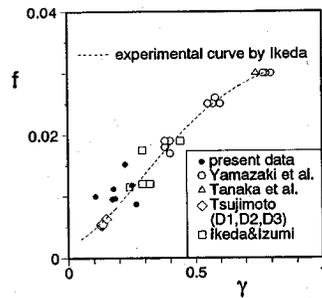


Fig. 21 Relation between f and γ

合は水深全体にわたって流入・流出が繰り返されそれが移流される現象に支配されている。これに対して、同じく横断方向せん断流として特徴づけられる複断面水路の横断混合では、領域境界で水面近傍と底面近傍で横断方向流が逆転する定常的な構造が混合に大きく貢献しており¹⁸⁾、植生帯を伴う流れと複断面流れの横断混合機構は異なったものであるといえる。

また、複断面水路の高水敷が植生に覆われた場合の横断混合特性は、上述の植生水路の混合特性と複断面水路の混合特性が干渉することが予想され、興味深い課題であるといえる。

6. 平均流場の表現

山崎ら¹⁴⁾による水平せん断流としての取扱いを踏襲して、低周波流速変動による横断方向の運動量フラックスを横断方向に一定の渦動粘性係数を用いて表現することから、次のような指数型の流速分布式が得られる。これは池田ら^{10), 11)}による摂動法を用いた解析の 1 次近似解とも一致する。

$$U_z = 1 + (\sqrt{\gamma} - 1) \exp\left(-\frac{z}{b_{**}}\right) \quad (z \geq 0) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$U_s = \gamma + (\sqrt{\gamma} - \gamma) \exp\left(\frac{z_s}{b_s}\right) \quad (z_s \leq 0) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $U_s \equiv U/U_{m0}$, $U_{m0} \equiv \sqrt{I_0 C_1} u_{s0}$, $u_{s0} \equiv \sqrt{g h_0 I_0}$, g : 重力加速度, I_0 : エネルギー勾配 (疑似等流状態では路床勾配に等しい), $z_s \equiv z/h_0$, $b_{ms} \equiv b_m/h_0 = \sqrt{\epsilon_{M^*} / 2 C_1}^{-1/4}$, $b_s \equiv b_s/h_0 = \sqrt{\epsilon_{M^*} / 2} (C_1 + \Omega)^{-1/4}$, b_m, b_s : 非植生域, 植生域の混合領域幅スケール, $\gamma \equiv U_{s0} / U_{m0} = \sqrt{C_1 / (C_1 + \Omega)}$, $\epsilon_{M^*} \equiv \epsilon_M / u_{s0} h_0$, ϵ_M : 渦動粘性係数である。

渦動粘性係数について, 池田ら^{10), 11)}, 山崎ら¹⁴⁾ は横断方向の速度差を用いて次の形式で表した。

$$\epsilon_{M^*} = f(1 - \gamma)(b_{ms} - b_s) C_1^{-1/2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに, f : 境界混合係数 ($f \equiv \tau_{ms} / \rho U_{m0}^2 (1 - \gamma)^2$; τ_{ms} : 植生境界に働く付加せん断力) であり, 池田ら^{10), 11)} は従来の実験値を整理して f に関する経験式を提案している。

今回の実験で得られた水深平均流速の横断方向分布を式 (1), (2) と比較した例が Fig.20 で, その対応は概ね良好である。式 (1), (2) と実測値がもっとも適応するように決められた f の値を池田ら^{10), 11)} が整理した図に追加したのが Fig.21 である。ばらつきがあるもののほぼ池田ら^{10), 11)} による経験式の傾向に一致している。ただし f 値は流れ場の性質が集約されたものであり, これを横断混合機構の検討から合理的に評価することが今後の課題といえる。

7. 植生域・非植生域をそれぞれ1次元化した水理解析モデル

植生域・非植生域境界での流出入横断流速とそれと相関の強い水面変動を解析するために両領域をそれぞれの混合領域幅スケール b_m, b_s の領域で別々に (相互作用は境界せん断力と流出入流速で表す) 1次元化し, また変動の移流的性質に鑑み移流速度での移動座標系で扱うことにする (Fig.22 参照)。通常1次元解析では流れの内部構造を抵抗係数に集約して扱うため流れの構造を検討するには適当でないが, 今取り扱おうとしている場合は低周波変動が横断混合を支配し, それに水面変動が関与していることから, 流れ場の概要を調べるにはこうした巨視的なモデルが有効と考えられる。

(1) 解析

それぞれの領域で運動量のつりあいを考えることから移動座標で見た水面形は, 例えば非植生域では次のように書ける。

$$\left\{ 1 - \frac{(u_m - c)^2}{g h_m} \right\} \frac{d h_m}{d X} = i_b - \frac{C_{fm}}{g h_m} u_m^2 - \frac{w}{g b_m} u_{exm} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$u_{exm} = \begin{cases} 2u_m - u_s - c & (w \geq 0) \\ u_m - c & (w \leq 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで, 添字の m, s はそれぞれ非植生域, 植生域での値を表し, $X \equiv x - ct$, x : 固定座標の縦断方向距離, c :

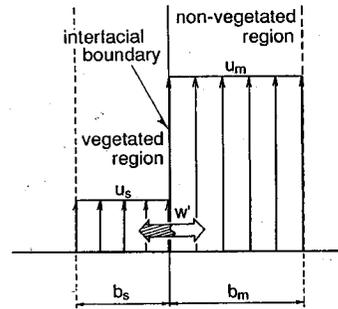


Fig.22 Schematic figure

変動の移流速度, h_m : 非植生域の水深, b_m : 非植生域の混合領域の幅, u_m : 非植生域の混合領域内での平均流速, w : 横流入横断流速で植生域から非植生域へ向かう向きを正と定義する。さらに $C_{fm} \equiv C_f$ である。ただし, 運動量補正係数は省略し, 静水圧分布を仮定した。一方, 連続式はやはり非植生域側で,

$$\frac{d\{(u_m - c)h_m\}}{dX} = \frac{w h_m}{b_m} \quad \dots\dots\dots(6)$$

と書ける。

式 (4) ~ (6) を無次元化して次式群が得られる。

$$\left\{ 1 - F_{i0}^2 \frac{(u_{ms} - c_s)^2}{h_{ms}} \right\} \frac{d h_{ms}}{d X_s} = i_b - C_{fm} F_{i0}^2 u_{ms}^2 - F_{i0}^2 \frac{w_s}{b_{ms}} u_{exms} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$u_{exms} = \begin{cases} 2u_{ms} - u_{ss} - c_s & (w_s \geq 0) \\ u_{ms} - c_s & (w_s \leq 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{d\{(u_{ms} - c_s)h_{ms}\}}{dX_s} = \frac{w_s h_{ms}}{b_{ms}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで, $F_{i0}^2 \equiv U_{m0}^2 / g h_0$, $u_{ms} \equiv u_m / U_{m0}$, $u_{ss} \equiv u_s / U_{m0}$, $u_{exms} \equiv u_{exm} / U_{m0}$, $w_s \equiv w / U_{m0}$, $c_s \equiv c / U_{m0}$, $h_{ms} \equiv h_m / h_0$, $X_s \equiv X / h_0$, $b_{ms} \equiv b_m / h_0$ である。流速, 水深を平均値と変動成分 (それぞれ大文字, 添字'を付けたもので表す) に分け, 式 (7) ~ (9) に代入し, $d h_{ms}' / d X_s$ のオーダーもただか変動量のオーダーであるとする, 変動成分どうしの高次項を省略し結局次式群が得られる。

$$\left\{ 1 - F_{i0}^2 (U_{ms} - c_s)^2 \right\} \frac{d h_{ms}'}{d X_s} = i_b + i_b h_{ms}' - C_{fm} F_{i0}^2 U_{ms}^2 - 2 C_{fm} F_{i0}^2 U_{ms} u_{ms}' - F_{i0}^2 \frac{w_s'}{b_{ms}} U_{exms} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$U_{exms} = \begin{cases} 2U_{ms} - U_{ss} - c_s & (w_s' \geq 0) \\ U_{ms} - c_s & (w_s' \leq 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$(U_{ms} - c_s) \frac{d h_{ms}'}{d X_s} + \frac{d u_{ms}'}{d X_s} = \frac{w_s'}{b_{ms}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで交番する横断方向流速を次式のように正弦波で与える。

$$w_s' = w_{0s} \sin \kappa X_s \quad \dots\dots\dots(13)$$

ただし、 $w_{0\#} \equiv w_0/U_{m0}$ 、 w_0 ：横断方向流速を正弦波で近似するときの振幅、 $\kappa \equiv \kappa h_0$ 、 κ ：変動の角波数である。このとき、式(10)の右辺第5項は、Fourier級数展開後、線形項のみ残すと、

$$-F_{r0}^2 \frac{w'_{0\#}}{b_{m\#}} U_{m\#} = -\frac{F_{r0}^2}{\pi b_{m\#}} (U_{m\#} - U_{s\#}) w_{0\#} - \frac{F_{r0}^2}{2b_{m\#}} (3U_{m\#} - U_{s\#} - 2c_{\#}) w_{0\#} \sin \kappa X_{\#} \quad \dots\dots(14)$$

となる。このとき水面形方程式の流下方向の1波長平均は場所的変化がない(疑似等流)から、

$$i - C_{tm} F_{r0}^2 U_{m\#}^2 - \frac{F_{r0}^2}{\pi b_{m\#}} (U_{m\#} - U_{s\#}) w_{0\#} = 0 \quad \dots\dots(15)$$

が成立する。上式の右辺第3項は植生域と非植生域の流れの相互作用による植生境界での付加せん断力を摩擦勾配の形で表現したものに相当する。

式(12)の連続式より、 u'_m の変動は次のように水面変動と関係づけられる。

$$u'_{m\#} = -\frac{w_{0\#}}{\kappa b_{m\#}} \cos \kappa X_{\#} - (U_{m\#} - c_{\#}) h'_{m\#} \quad \dots\dots(16)$$

式(15)、(16)を考慮すると水面形方程式は次のように整理される。

$$\frac{dh'_{m\#}}{dX_{\#}} + P_m h'_{m\#} = Q_m(X_{\#}) \quad \dots\dots(17)$$

$$P_m = \frac{F_{r0}^2}{\{1 - F_{r0}^2 (U_{m\#} - c_{\#})^2\}} [C_{tm} U_{m\#} (2c_{\#} - 3U_{m\#})] \quad \dots\dots(18)$$

$$Q_m(X_{\#}) = \frac{F_{r0}^2 w_{0\#}}{b_{m\#} \{1 - F_{r0}^2 (U_{m\#} - c_{\#})^2\}} \times \left[-\frac{(3U_{m\#} - U_{s\#} - 2c_{\#})}{2} \sin \kappa X_{\#} + \frac{2C_{tm} U_{m\#}}{\kappa} \cos \kappa X_{\#} \right] \quad \dots\dots(19)$$

上式の解は次のように求められる。

$$h'_{m\#} = r_{tm} w_{0\#} \sin(\kappa X_{\#} - \phi_{tm}) \quad \dots\dots(20)$$

$$r_{tm} = \frac{F_{r0}^2 A_{tm}}{b_{m\#} \{1 - F_{r0}^2 (U_{m\#} - c_{\#})^2\} \sqrt{\alpha_{m\#}^2 + \kappa^2}} \quad \dots\dots(21)$$

$$A_{tm}^2 = \left\{ \frac{(3U_{m\#} - U_{s\#} - 2c_{\#})}{2} \right\}^2 + \left\{ \frac{2C_{tm} U_{m\#}}{\kappa} \right\}^2 \quad \dots\dots(22)$$

$$\alpha_{m\#} = \frac{C_{tm}}{\{1 - F_{r0}^2 (U_{m\#} - c_{\#})^2\}} U_{m\#} (2c_{\#} - 3U_{m\#}) \quad \dots\dots(23)$$

$$\sin \phi_{tm} = \sin \phi_{1m} \cos \phi_{2m} + \cos \phi_{1m} \sin \phi_{2m} \quad \dots\dots(24)$$

$$\cos \phi_{tm} = \cos \phi_{1m} \cos \phi_{2m} - \sin \phi_{1m} \sin \phi_{2m} \quad \dots\dots(25)$$

$$\sin \phi_{1m} = \frac{2C_{tm} U_{m\#}}{\kappa A_{tm}} S_m \quad \dots\dots(26)$$

$$\cos \phi_{1m} = \frac{(3U_{m\#} - U_{s\#} - 2c_{\#})}{2A_{tm}} S_m \quad \dots\dots(27)$$

$$\sin \phi_{2m} = \frac{\kappa}{\sqrt{\alpha_{m\#}^2 + \kappa^2}} \quad \dots\dots(28)$$

$$\cos \phi_{2m} = \frac{\alpha_{m\#}}{\sqrt{\alpha_{m\#}^2 + \kappa^2}} \quad \dots\dots(29)$$

ここで、 $S_m=1$ である。これらを式(12)に代入して整理

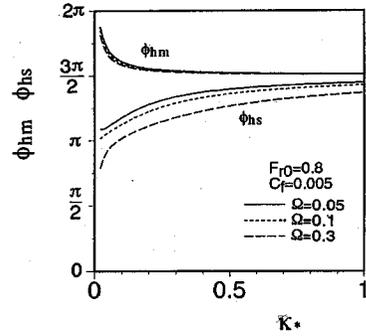


Fig. 23 Analytically obtained phase shift of water surface to transverse velocity

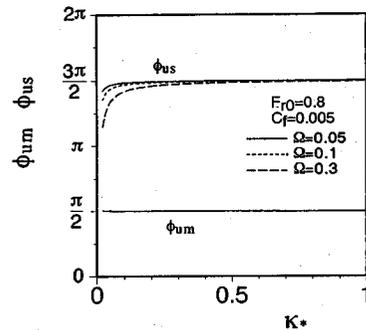


Fig. 24 Analytically obtained phase shift of longitudinal velocity to transverse velocity

すると、 u'_m が次のように求められる。

$$u'_{m\#} = r_{lm} w_{0\#} \sin(\kappa X_{\#} - \phi_{lm}) \quad \dots\dots(30)$$

$$r_{lm}^2 = \{(U_{m\#} - c_{\#}) r_{tm} \cos \phi_{tm}\}^2 + \{(U_{m\#} - c_{\#}) r_{tm} \sin \phi_{tm} - S_m / \kappa b_{m\#}\}^2 \quad \dots\dots(31)$$

$$\sin \phi_{lm} = \frac{(U_{m\#} - c_{\#}) r_{tm} \sin \phi_{tm} - S_m / \kappa b_{m\#}}{r_{lm}} \quad \dots\dots(32)$$

$$\cos \phi_{lm} = \frac{(U_{m\#} - c_{\#}) r_{tm} \cos \phi_{tm}}{r_{lm}} \quad \dots\dots(33)$$

同様に植生域側について解析を進め h'_s について解くとその解は式(20)～(33)で添字 m を植生域側の量を示す s に変えればよい。ただし $S_s = -1$ 、 $C_{ts} = C_t + \Omega$ である。

(2) 解析結果

以上のように横断方向流速変動に対する主流速変動、水位変動の関係が得られたが、解析結果を評価するには非植生域、植生域の平均流速、混合領域幅、変動の移流速度、波数を与える必要がある。平均流速の横断方向分布に先の指数関数式を用いれば、 $U_{m\#}$ 、 $U_{s\#}$ はそれぞれ次のように表される。

$$U_{m\#} = \sqrt{\gamma} + (1 - \sqrt{\gamma})e^{-1} \quad \dots\dots(34)$$

$$U_{s\#} = \sqrt{\gamma} + (\gamma - \sqrt{\gamma})e^{-1} \quad \dots\dots(35)$$

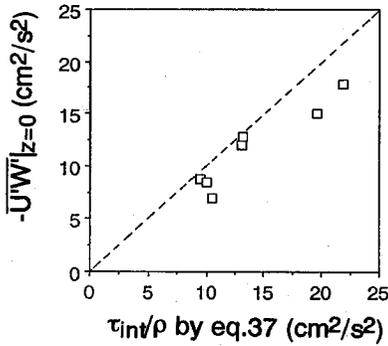


Fig. 25 Apparent shear stress

混合領域幅を与える $f \sim \gamma$ 関係について、池田ら^{10), 11)} の経験式を用い、変動の移流速度が混合域での平均流速に等しいとすれば、解析モデル (式 (24), (25) など) で求められる水面変動の横断方向流速変動に対する位相差は Fig. 23 に示すようである (ただし、位相差に関しては混合領域幅の与え方の影響はほとんどない)。ここでは位相差を空間座標上で定義しているの为先 (第 5 章) 時間軸上で定義されたそれとは符号反対の関係にある。得られた結果は Fig. 15 の実験結果とよく一致し、特に植生域と非植生域で水面変動がほぼ同位相となる特性を再現している。

Fig. 24 は横断方向流速変動に対する主流方向流速変動の位相差の解析結果を示したものである。Fig. 17 の実験結果と比較すると植生域・非植生域とも植生境界より離れたところでの一致はよいが、植生境界近傍で連続的に変化する様子は表現できない。これは両域をそれぞれ 1 次元化して取り扱ったことで説明できなくなった 1 つの側面である。

式 (15) から評価される植生境界での付加せん断力は次のように書ける。

$$\frac{\tau_{in}}{\rho} = \frac{g b_m}{\rho} \left[\frac{F_{r0}^2}{\pi b_{m\#}} (U_{m\#} - U_{s\#}) w_{0\#} \right] = \frac{u_{m0}^2}{\pi} w_{0\#} (U_{m\#} - U_{s\#}) \quad (36)$$

先の指数型の流速分布式を用いれば $(U_{m\#} - U_{s\#})$ は式 (34), (35) から γ を用いて表現することができ、式 (36) は次のように書き直せる。

$$\frac{\tau_{in}}{\rho} = \frac{u_{m0}^2}{\pi e} w_{0\#} (1 - \gamma) \quad (37)$$

$w_{0\#}$ として植生境界での横断方向流速変動の標準偏差の実測値を与え、上式から計算される付加せん断力と実測された植生境界での $-\overline{U'W'}$ とを比較したのが Fig. 25 であり、その対応はおおむね良好である。

8. 結言

本研究では側岸部に植生群落を有する開水路流れで観

察される水面変動を伴う横断混合現象について、水面変動、各流速変動成分の時空間相関、これらの量相互の相関を工夫された同時計測によって調べ、これまで様々な側面を個別に調べて推測されていた次の性質を、豊富な測定項目からうきばりにした。

- (1) 水面変動・流速変動は低周波で比較的規則正しく、ほぼ混合域での平均流速程度で移流される。
- (2) 横断方向の運動量混合は主としてこうした低周波の主流速変動・横断方向流速変動の相関に拠っている。
- (3) 水面変動は横断方向にほぼ同位相であるが、植生域と非植生域で振幅が異なるため交番する横断水面勾配が生じる。こうした水面変動に対する横断方向流速変動の位相差がほぼ $3\pi/2$ であり、水面変動を媒介にして横断混合が生じることが類推された。

(4) 流体運動は水深方向にはほぼ一様な特性を示しており、2次元性の強い現象であると言える。すなわち、横断混合は水深方向に一体となった流入・流出が繰り返され、それが移流される現象に支配される。

さらに、水面変動を伴う低周波の横断混合について、植生域・非植生域をそれぞれ 1 次元化し両流路の相互作用は境界面で交番する横流入出流速で代表する解析から現象のモデル化に基づく理論的解釈を行なった。解析モデルは 1 次元解析という制約があるものの水面変動と流速変動の相関構造を説明するとともに、低周波変動による横断混合が付加的抵抗を生じさせる過程を説明した。

付録：式(4)の誘導

変動の移流速度 c で移動する移動座標系 ($X=x-ct$) において流下方向に dX 、横断方向に単位幅のコントロールボリューム内で運動量解析を行なう (Fig. A1 参照)。

非植生域の流れに関して (以下、非植生域の値には添字 m 、植生域の値には添字 s を付ける)。

移動座標系上での置換単位幅流量 q' 、連続式、運動量 M はそれぞれ、

$$q_m' = (U_m - c) h_m; \quad \frac{dq_m'}{dX} = \frac{wh_m}{b_m}; \quad M_m = \rho q_m' (U_m - c) \quad (A-1)$$

と書ける。一方、横流入入流によりコントロールボリューム内に付加される運動量は、

$$\Delta M_m = \rho \frac{wh_m}{b_m} U_{adm} dX; \quad U_{adm} = \begin{cases} U_s - c & (w \geq 0) \\ U_m - c & (w \leq 0) \end{cases} \quad (A-2)$$

であり、断面平均圧力 P は静水圧近似では、

$$P_m = \frac{1}{2} \rho g h_m^2 \quad (A-3)$$

と表される。ただし運動量補正係数は省略している。ここで、 ρ : 水の密度、 U : 断面平均流速、 w : 横流入出流速 (植生域から非植生域へ向かう向きを正と定義す

る), h : 水深, b : 流路幅である。

コントロールボリューム内での運動量のつり合いは次のように書ける。

$$\left(M_m + \frac{dM_m}{dX} \right) - M_m - \Delta M_m = P_m - \left(P_m + \frac{dP_m}{dX} \right) + \rho g h_m i_b dX - \rho C_{f_m} U_m^2 dX \quad \dots (A-5)$$

ここで, i_b : 路床勾配, C_f : 抵抗係数である。よって,

$$\frac{dM_m}{dX} - \frac{\Delta M_m}{dX} + \frac{dP_m}{dX} = \rho g h_m i_b - \rho C_{f_m} U_m^2 \quad \dots (A-6)$$

となる。若干の演算の後, 式(4)が得られる。

植生域についても符号の正負に注意して同様に水面形方程式が導かれる。

参考文献

- 1) 辻本哲郎: 植生を伴う流れの水理, 水工学シリーズ, 91-A-5, 土木学会水理委員会, 1991.
- 2) 福岡捷二・藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告, 第180号, pp.129-192, 1990.
- 3) 辻本哲郎・北村忠紀: 河道内の植物群落調査と植物群落養成の河川工学的意義, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp.537-542, 1992.
- 4) 辻本哲郎・岡田敏治・村瀬尚: 扇状地河川の川原の植物群落と河道特性—手取川における調査—, 土木学会水工学論文集, 第37巻, pp.207-214, 1993.
- 5) 藤田光一・福岡捷二: 洪水流における水平乱流混合, 土木学会論文報告集, No.429/II-15, pp.27-36, 1991.
- 6) Tsujimoto, T.: Mixing process in open channel with vegetated region, *Proc. Int. Sym. on Environmental Hydraul.*, Hong Kong, pp.409-414, 1991.
- 7) Tsujimoto, T.: Spectral analysis of velocity and water-surface fluctuations appearing in an open channel with vegetated and non-vegetated regions in a cross section, *Proc. 6th Int. Sym. on Stochastic Hydraul.*, Taipei, Taiwan, R.O.C., pp.361-368, 1992.
- 8) 辻本哲郎・北村忠紀: 側岸に沿って植生群落がある流路での水面変動を伴う横断混合, 土木学会水工学論文集, 第36巻, pp.273-280, 1992.
- 9) 辻本哲郎・北村忠紀・中川博次: 植物群落周辺の掃流砂

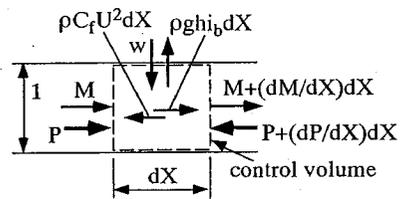


Fig. A1 Balance of momentum in control volume

運動と河川敷地形の形成, 土木学会水工学論文集, 第37巻, pp.687-692, 1993.

- 10) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋: 側岸部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文報告集, No.443/II-18, pp.47-54, 1991.
- 11) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋: 側岸部植生帯が流れ及び粒子懸物質の輸送に及ぼす影響, 土木学会論文報告集, No.447/II-19, pp.25-34, 1992.
- 12) 石川忠晴・高橋和明・細井俊一: 河岸植生付近の横断混合流れの位相平均解析, 土木学会水工学論文集, 第37巻, pp.837-840, 1993.
- 13) Chu, V.H., J.H.Wu and R.E.Khayat: Stability of Transverse Shear Flows in Shallow Open Channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.117, No.10, pp.1370-1388, 1991.
- 14) 山崎真一・石川忠晴・金丸督司: 開水路平面せん断流に関する実験的研究, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, II-237, pp.473-474, 1984.
- 15) 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, 土木学会水工学論文集, 第36巻, pp.265-272, 1992.
- 16) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠紀: 直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.438/II-17, pp.31-40, 1991.
- 17) Tsujimoto, T. and T. Kitamura: Experimental Study on Open-Channel Flow with Vegetated Zone along Side Wall - Correlative Structures of Fluctuations of Velocity and Free Surface -, *KHL-Commun.*, Kanazawa Univ., No.3, pp.21-35, 1992.
- 18) 石垣泰輔・今本博健・武藤裕則: 複断面開水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの混合機構に関する実験的研究, 土木学会水工学論文集, 第36巻, pp.139-144, 1992.

(1993.6.2 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANISM OF TRANSVERSE MIXING IN OPEN-CHANNEL FLOW WITH LONGITUDINAL ZONE OF VEGETATION ALONG SIDE WALL

Tetsuro TSUJIMOTO and Tadanori KITAMURA

In this study, the mechanism of transverse mixing in open-channel flow with longitudinal zone of vegetation along side wall is investigated. Flume experiments with idealized vegetation zone are conducted. As a result, the followings are postulated: transverse mixing is caused by rather organized and low-frequency fluctuation of transverse velocity, and it is maintained by association of water-surface fluctuation. By hydraulic analysis where vegetated and non-vegetated zones are treated separately as two neighboring one-dimensional flows but considering the alternate transverse flow at the interface between them, the phase relations among respective velocity components and water-surface fluctuation are explained.