

棧粗度の斜め配置による開水路流れの制御 Control of Turbulent Open-Channel Flows by Skew-Arrangements of Strip Roughness

辻本哲郎*・宮垣圭吾**・森田優子***

By Tetsuro TSUJIMOTO, Keigo MIYAGAKI and Yuko MORITA

Skew arrangements of strip roughness induces a helicoidal motion of flow, and the transverse components near the free surface and near the bottom have different signs, which may restrict the zones where the materials are transported. In this study, the representative profile of the transverse velocity is analytically deduced from a simplified two-dimensional model, and field measurement of turbulent flow over skew arrangements of strip roughness is conducted in an irrigation canal, which is often used for a conveyance of removed snow in winter. Furthermore, V and Λ type arrangements of strip roughness are investigated in order to apply such a helicoidal motion of flow to practical problems of effective conveyance of several materials.

Keywords: open-channel flow, strip roughness, helicoidal motion, artificial roughness, eddy viscosity, field measurements.

1. まえがき

最近街づくりに占める水辺空間の役割が重要視され、町並みに「流れ」が積極的に取り入れられたり、既存の用水の景観・機能を一新させようとの試みが見られるようになった。このような流路は小規模であるが、より多彩な機能が要求されることが多い。例えば「清らかな流れであること」がより強く求められたり、雪国では「消・流雪溝」としての機能が求められたり、あるいはカヌーなどのリクレーション・スポーツの場としての機能であったりする。大河川ではこうした多面的な機能に対する水路の構造的便宜を図るとしはしば治水安全度が保てないことから後手に回っていたが、「環境」用水などでは洪水時には上流端での流入流量を容易にカットできることなどからこうした多面的機能を有する構造的工夫が可能である。むしろ積極的にこうした流れの制御を行なって住民の要望に応えることが必要であるし、蓄積された知識・技術はいずれ大河川の洪水制御・環境整備等に充分役立つことになろうと期待される。

上記の点に鑑み、ここでは流れに「螺旋流」を強制的に作り出し水面近傍、底面近傍で望ましい横断方向流成分を与えるような、棧粗度の「斜め配置」を考える。これは水面及び底面近傍では流れが異なる物質を輸送していることに着目し、こうした物質の輸送帯を流れの横断面内で制御することを目的としている。水

* 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)

** 学生会員 金沢大学大学院 工学研究科修士課程土木建設工学専攻

*** 学生会員 金沢大学 工学部土木建設工学科

面近傍の流れによって輸送されるものとしては流木などの塵芥、雪氷、カヌーなどの船舶（通常、流路の真ん中を航行したい）であり、底面近傍を輸送されるものの代表は流砂でこれによって河床形状が支配される。

2. 棧粗度の斜配置と期待される螺旋流

棧粗度を図1(a)のように斜めに配置すると底面で斜めに棧に沿って流れ側壁で上昇、表面で反対方向に斜めに流れ反対側の側壁に沿って下降する形で螺旋流が形成されることが期待される。こうした流れは表面付近を流下する物質を片側の側岸近傍に寄せる働きをする。例えば流下物が寄って来る側での横越流で流下物を排除できる。

一方図1(b), (c)のような斜め棧粗度を組み合わせたV型, A型の配置では側岸沿いを境に2つの螺旋流の並列が期待される。V型では水路側壁で上昇流、水路中央で下降流となり、表面近傍流下物は水路中央に集中する。流雪溝に投入された雪塊を閉塞ささずに流したり、流木・塵芥を側岸寄りの植生帯に引っ掛かることのないよう流下させたり、カヌー・ボートなどが水路中央を側岸にぶつからず航行しやすくなる。逆にA型では表面付近を流下する物質は側岸沿いに寄って来ることになり、塵芥の横越流排除を容易にする。

本研究では矩形断面直線水路で縦断方向に均質（疑似）等流を想定した。ちなみに流れに直角な棧粗度の場合、棧間隔・棧高さ比が10から20程度では縦断方向に比較的均質な粗面乱流場となることが知られている¹⁾。そこで本研究では、棧間隔・棧高さ比がこの程度の棧粗度を基本とし、これを水路に斜めに配置することで「螺旋流を伴う縦断方向には疑似的に等流状態の乱流」を作り出せるものと考えた。期待される螺旋流による水面及び底面近傍での横断方向流速に着目して利用目的に応じた粗度配置の検討を行なうための基礎的知見を得る目的で、簡単な解析と実験を行なった。

3. セルの中心を通る鉛直線に沿った流速分布の考察

簡単のため先にも述べたように流下方向に均質な場として解析する。実際には棧の形状抵抗（抗力 D ）と路床での摩擦抵抗が重力の流下方向成分と釣り合っているのであるが、ここでは形状抵抗と摩擦抵抗の和（前者に対し後者は無視しうるほど小さい）に相当するせん断力が棧頂を連ねる面（ $y=0$ ）に作用しているものと想定する。その単位面積当たりの力を τ_{x0} , τ_{z0} と表す。 τ_{z0} の存在は棧が流れに直角でない場合に生じる抗力の横断方向成分 D_z に起因するものであり、これが重力の横断方向成分と釣り合うような水面の横断勾配 i_{wz} の出現が期待される（図2参照、V型棧粗度上の流れを対象として示してある）。

$y=0$ での主流方向流速 U_0 を代表流速として抗力の x, z 方向成分（単位幅当たり D_x , D_z ）を表すと、摩擦を無視して次のようである。

$$D_x = \frac{1}{2} C_D \rho U_0^2 k \sin \theta; \quad D_z = \frac{1}{2} C_D \rho U_0^2 k \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 θ : 棧と流路のなす角度、 C_D : 抗力係数、 k : 棧高さ、 ρ : 水の密度である。よって棧間隔を s とすると、 τ_{x0} , τ_{z0} は次のように表される。

$$\tau_{x0} = \frac{D_x}{s} = \frac{1}{2} C_D \rho U_0^2 \frac{k}{s} \sin \theta; \quad \tau_{z0} = \frac{D_z}{s} = \frac{1}{2} C_D \rho U_0^2 \frac{k}{s} \cos \theta \quad (2)$$

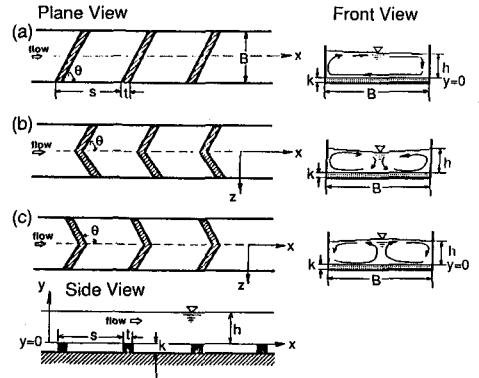


図1 棧の斜め配置と誘起される螺旋流

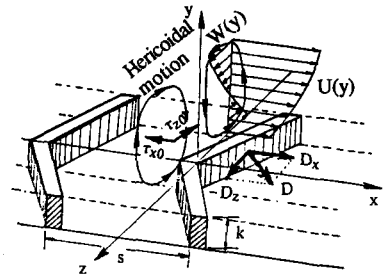


図2 説明図

一方、重力との釣り合いから、せん断応力分布は次のようである。

$$\tau_x(y) = \tau_{x0}(1 - \frac{y}{h}) = \rho u_*^2(1 - \frac{y}{h}) ; \quad \tau_z(y) = \tau_{z0}(1 - \frac{y}{h}) = \rho w_*^2(1 - \frac{y}{h}) \quad (3)$$

$$\tau_{x0} = \rho u_*^2 = \rho g h i_b ; \quad \tau_{z0} = \rho w_*^2 = \rho g h i_{wz} \quad (4)$$

これは、斜め棧粗度による螺旋流が次のように水面の横断勾配を生むことを意味している。

$$i_{wz}/i_b = \tau_{z0}/\tau_{x0} = \cot\theta \quad (5)$$

ここに、 i_b ：路床勾配である。上式は誘起される横断方向の水面勾配、せん断応力と、流下方向のそれらとの比が棧の配置角度 θ で一意的に決まることを示している。

螺旋流のセル中心を通る鉛直線では平均流速の鉛直成分はゼロで、流下・横断方向流速 (U, W) の鉛直方向混合は乱流混合によって見做せる。すなわち式(3)で与えられるせん断応力はすべてReynolds応力 $-\overline{u'v'}$ 、 $-\overline{w'v'}$ によって受け持たれていると見做せ、例えば渦動粘性モデルを用いて次のように書ける。

$$-\overline{u'v'} = \varepsilon_{xy} \frac{dU}{dy} ; \quad -\overline{w'v'} = \varepsilon_{zy} \frac{dW}{dy} \quad (6)$$

ここに、 ε_{xy} 、 ε_{zy} は流下・横断方向運動量の鉛直方向の乱流混合についての渦動粘性係数である。簡単のため ε_{xy} 、 ε_{zy} を水深方向に一定とし、またこの場合 $y=0$ は固体壁ではないから、 $y=0$ でスリップ速度 U_0 、 W_0 を認めて、流速分布を次のように誘導できる。

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\eta}{\varepsilon_{xy}^*} \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) + \frac{U_0}{u_*} ; \quad \frac{W}{w_*} = \frac{\eta}{\varepsilon_{zy}^*} \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) + \frac{W_0}{w_*} \quad (7)$$

ただし、 $\eta=y/h$ 、 $\varepsilon_{xy}^* = \varepsilon_{xy}/(u_*h)$ 、 $\varepsilon_{zy}^* = \varepsilon_{zy}/(w_*h)$ と無次元化している。棧の抗力係数 C_D がわかっていると U_0 は式(2)、(4)から決定され、一方、 W_0 は横断方向流速分布は水深にわたって積分するとゼロになることを用いて決定され、それぞれ次のようになる。

$$\frac{U_0}{u_*} = \sqrt{\frac{2}{C_D \sin\theta}} \frac{s}{k} ; \quad \frac{W_0}{w_*} = -\frac{1}{3\varepsilon_{zy}^*} \quad (8)$$

$U(y)$ はそのプロファイルは ε_{xy}^* の値に支配され底面条件が粗度の性質 (k, s, C_D) に依存しているのに対し、 $W(y)$ は ε_{zy}^* の値にのみ依存して粗度にかかわる条件からは独立である。

4. 斜め棧粗度上の流れに関する実験

金沢市金浦用水（浅野川水系）の一部分のコンクリート矩形断面直線区間（幅1.5m、直線部約30m）において実験を行なった（写真1）。実験時の流量は一定に保たれ、下流の水門の開度の調整及び下流端で土囊による堰上げによってほぼ等流状態を保った。棧粗度は、1辺6cmの正方形断面（ $k=t=6.0\text{cm}$ ）のコンクリート製角材を作成しこれを水路に等間隔（ s ）に設置した。流速測定は小型電磁流速計（KENEK VM201）を用いて行なった。流速計のプロープは直径0.8cm、長さ3cmの円筒形で、L型のサポートで路床に平行な面に設置される。L型サポートを回転させることで流速の流下方向（ x ）・鉛直方向（ y ）の2成分（ u, v ）、あるいは横断方向（ z ）・鉛直方向の2成分（ w, v ）が同時計測される。プロープの約40cm上方からは直径2.0cm、長さ2.0mのスチールパイプ（外壁に目盛が刻んである）にコードとともに挿入して一体化させ、これを鉛直方向に精度良く昇降させられるよう工夫して水路に渡した測定ブリッジに固定した。ブリッジ上では横断方向に流速計の位置を変えることが出来、またブリッジは縦断方向にスライドして位置を変えることが出来る。流速計（時定数0.05s）の出力は20Hzで約1分間デジタルレコーダ（TEAC DR-F1）でフロッピーに記録した。データは室内水路での自走台車を用いて得ら

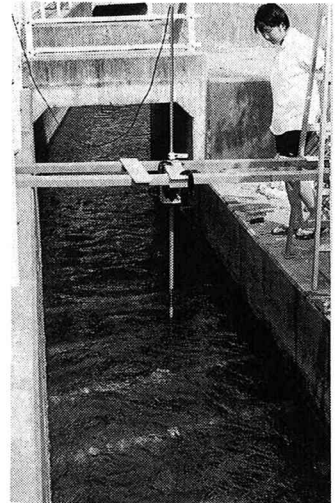


写真1 斜め棧粗度の実験

れた較正曲線で流速時系列に変換され、平均流速 (U, V, W)、乱れ強度 ($u'_{rms}, v'_{rms}, w'_{rms}$)、Reynolds応力 ($-\overline{u'v'}, -\overline{v'w'}$) などが計算された。電源は乗用車の直流電源 (12V) を直流・交流変換器 (Daisy SL130-12) で交流 (100V) に変換して用いた。

水路幅全部にわたり棧粗度を一定角度で一定間隔に設置した。 $\theta=90^\circ$ は通常の棧粗度で、斜めにおかれた粗度上の流れとの比較に供される。実験条件は表1にまとめられている。流速測定は水路中心軸に沿って及び棧に平行に選んだ鉛直測線でそれぞれ約15点で行なった。なお棧を設置しない場合についての計測を同区間で昨年度実施しており²⁾、相対水深の小さい実験室水路で蓄積された乱流構造についての知見がそのまま成立していることが確認されている。

図3, 4に水路中心軸に沿った主流 (x 方向) 流速 (U) 及びReynolds応力 ($-\overline{u'v'}$) の鉛直方向分布の変化例を示す (x : 棧頂からの流下方向距離)。いずれも底面近傍 (とくに棧頂部) では路床条件の局所形状 (棧の存在) に影響されているが概ね流下方向に均質な場と見做せる。Reynolds応力の分布も (棧の角度に関わらず) 局所的な路床条件に左右される底面近傍を除いては平均的な $y=0$ でのせん断応力 (τ_{x0}) で規定されるような三角形分布で近似できる。若干のばらつきは無視して、このようなReynolds応力の三角形分布から $y=0$ への外挿値として τ_{x0} あるいは u_* を評価した (図中に値を記載)。図5, 6は、棧を斜めに配置したとき水路中心軸で測られた横断方向流速 (W) 及びReynolds応力 ($-\overline{w'v'}$) の鉛直方向分布の例である。 $W(y)$ の流下方向変化は顕著でなく、また W は水面、底面近傍で符号が逆転しており、流下方向に均質な螺旋流構造を認めることができる。Reynolds応力 ($-\overline{w'v'}$) の分布は三角形で良く近似でき、式(4)の成立が支持されている。この三角形外挿によって τ_{x0} あるいは w_* を評価した (図中に値を記載)。評価された τ_{x0} と τ_{y0} の比は式(5)で与えられるもの ($\cot\theta=0.35$) と必ずしも良い一致を見ないが測定の誤差の範囲内と思われる。

先のように評価された u_*, w_* を用いて無次元化された水路中心軸での流下方向及び横断方向流速の分布を図7, 8に示した。図中の曲線は式(7) (式(8)を代入したもの) を表し、ここで抗力係数 C_D は1.5としている。これは一様流中におかれた有限長さの平板に働く抗力についての実験結果³⁾ とほぼ一致した値である。また

表1 実験条件表 (斜め棧粗度)

RUN	k (cm)	s (cm)	h (cm)	θ (degree)
P1	6.0	110	37.0	90
S1	6.0	110	38.0	70
S2	6.0	110	38.0	60
S3	6.0	90	32.0	70

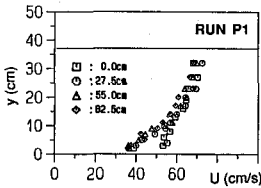


図3 水路中心軸に沿う $U(y)$ の変化

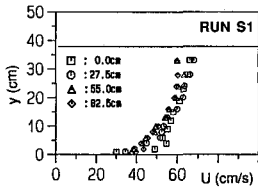


図4 水路中心軸に沿う $-u'v'$ 分布の変化

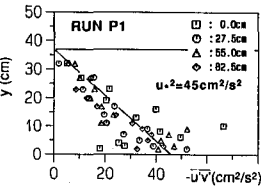


図5 水路中心軸での $W(y)$

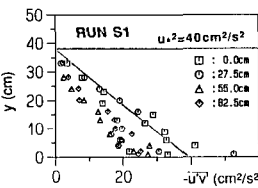


図6 Reynolds応力 $-\overline{w'v'}$

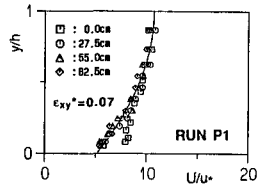


図7 無次元化された主流速分布

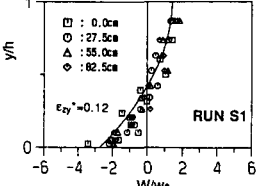
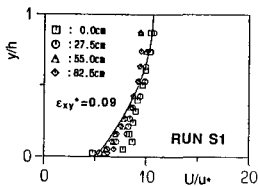


図8 無次元化された横断方向流速

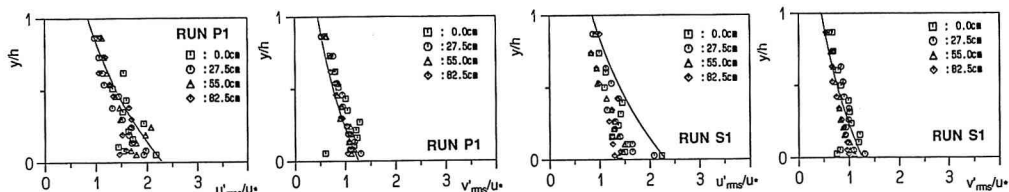


図9 乱れ強度分布

渦動粘性係数については実験値と合致するように決定した。これらは斜め棧粗度では2次元等流での値 ($\kappa/6=0.067$, κ : Karman定数) より若干大きい。図9は水路中央での乱れ強度分布で斜め棧の場合主流方向の乱れ強度が若干低減されているようであるが、2次元等流の結果(実線で表示)とほとんど変わらない。

5. 棧のV・Λ型配置による螺旋流の形成

3, 4で斜めに配置された棧粗度が螺旋流を誘起することが明らかにされ、主たる2次流成分が評価されたが、先にも述べたように棧の平面配置をV型あるいはΛ型にして2列の螺旋流を作り出すことは工学的に利用価値が高い。この期待を確認するため金浦用水の直線流路区間(幅1.5m, 直線部の長さ約30m)でコンクリート角材を用いてV型・Λ型に棧粗度を配置し、その上の流れを4と同じ方法で計測した(写真2)。さらに実験室水路(長さ12m, 幅0.4m)でも1辺1cmの木材を棧粗度に用いて同様の実験を行なった⁴⁾。ここでは水路の大きさの制限から主流速は直径3mmのプロベラ流速計で、(V,W)成分を小型電磁流速計(このときプロベラの流れへの投影面積は最小)で測定した。これらの実験条件は表2にまとめられている。

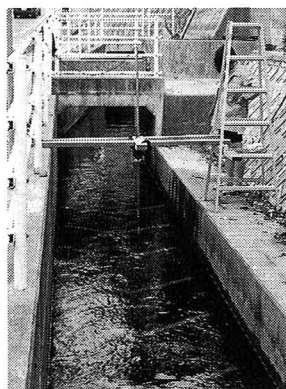


写真2 V, Λ型棧粗度の実験

表2 実験条件表 (V, Λ型棧粗度)

RUN	k (cm)	s (cm)	h (cm)	θ (degree)	Type	Note
FV	6.0	110	40.0	60	V	field
FA	6.0	110	36.0	120	Λ	field
V1	1.0	10	6.2	75	V	laboratory
V2	1.0	10	10.3	75	V	laboratory
V3	1.0	10	10.1	75	V	laboratory
Λ1	1.0	10	6.6	105	Λ	laboratory
Λ2	1.0	10	10.4	105	Λ	laboratory
Λ3	1.0	10	11.3	105	Λ	laboratory

図10は水路中心軸に沿う流速の主流方向・鉛直方向成分の分布 $U(y)$, $V(y)$ V型・Λ型粗度上流れて比較したものであり、この例では必ずしも流下方向の均質性は保たれていない。たとえば粗度頂部ではV, Λ型を問わず上昇流が強いなど、上昇流の強さの流下方向変化がこの不均一性をもたらしている。しかしながら、1波長平均的には水路中心軸に沿ってV型では下降流、Λ型では上昇流が認められ、これらによる運動量の直接輸送によりそれぞれ主流速の分布が歪まされている。図11は棧と棧の中央で棧に平行な断面で調べられた $U(y)$, $V(y)$, $W(y)$ の横断方向変化(図中の z は水路中心軸から測られた横断距離)で、側壁近傍で水路中心軸と符号が反対の鉛直成分が認められ、2列螺旋流の形成を示している。これらの結果、セル中心は水路片側で上昇流側に偏しており、そこでは3, 4で検討した $W(y)$ の分布が現われている。ただしここでも主流流速分布 $U(y)$ が2次元等流のそれより歪んでおり、先に求められたプロファイルがそのまま適用できるとは限らない。

実験室水路では棧の角度を大きく(直角に近く)した流れで測定が行なわれた⁴⁾。この結果から図12に断面での速度ベクトル図、図13にセル中心での横断方向流速分布と式(7)(式(8)を代入したもの)の比較を

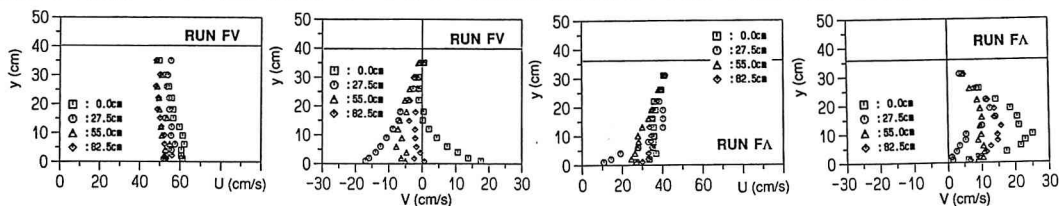


図10 水路中心軸に沿う $U(y)$, $V(y)$ の変化 (V, Λ型棧粗度の比較)

示す。上昇流部に偏してセル中心を持つ2列螺旋流の形成が明示されており、またこの程度の弱い2次流であれば3の取り扱いで水面・底面近傍の偏流を推定できることが示されている。

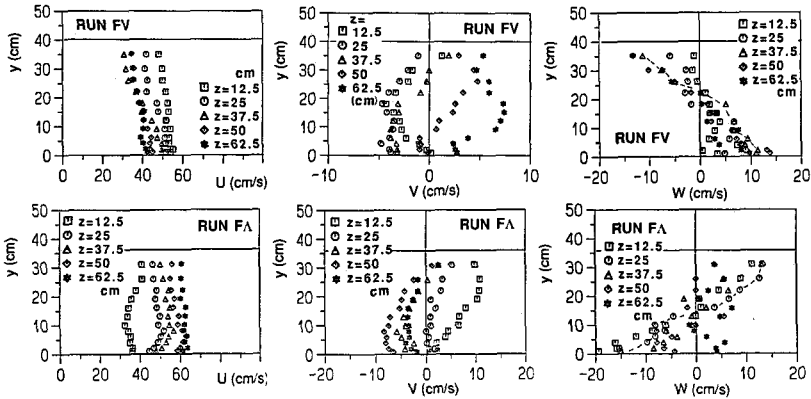


図11 U(y), V(y), W(y)の横断方向変化 (V, A型栈粗度の比較)

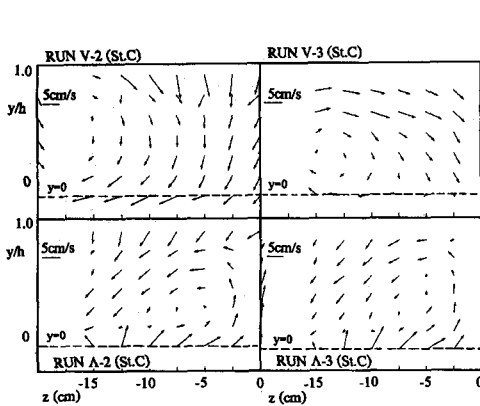


図12 断面内流速ベクトル図

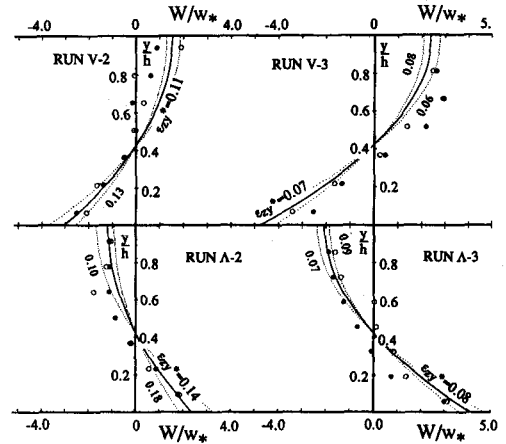


図13 セルの中心を通る鉛直線沿うW(y)

6. あとがき

本研究では流下方向にはほぼ均質な構造をもたらす間隔（栈高さの10倍程度）で、斜めに配置された栈粗度が、螺旋流を産み出し、水面と底面近傍で異なる符号の横断流成分が誘起されることを確認した。セルの中心では流速の鉛直方向成分がないため横断方向運動量の鉛直方向フラックスも三角形分布し渦動粘性モデルを用いて流下方向・横断方向流速の鉛直分布が解析的に求められ、実験結果を良く説明できることがわかった。さらに流下物の流送帯を制御するのにV型あるいはA型に栈粗度を配置することを提案し、所要の強さの2列螺旋流を産み出せることを実験で示した。ただし、いずれの場合も栈の流路に対する角度を小さくすると2次流成分が大きくなって乱流混合モデルを援用した解析で求められる流速分布からは大きく歪む。こうした大規模な構造による流速場の歪みについては今後数値計算モデルを援用して行きたい。またこのような流れの制御を流雪溝の能率向上など実用面に活かしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 足立：開水路における栈型人工粗度の実験的研究，京都大学防災研究所年報，第3号，1959.
- 2) 辻本・北村・岡田・王子：小型電磁流速計による野外流路での乱流測定，水工学論文集，第35巻，1991.
- 3) 土木学会編：新版土木工学ハンドブック，上巻，p.455，1974.
- 4) Tsujimoto, T., A. Saito & K. Okamoto : Secondary flow induced by V and A arrangements of strip roughness in open channel, Memo. Fac. of Tech., Kanazawa Univ., pp.79-91, 1989.