

粗度近傍の組織的流速変動場が相対水深の 小さな流れの乱流構造に及ぼす影響

Turbulent Structure of Flow with Small Relative Submergence Affected by Organized Fluctuation Due to Vortex-Sheddings from Roughness Elements

京都大学工学部 中川博次 Hiroji NAKAGAWA

金沢大学工学部 辻本哲郎 Tetsuro TSUJIMOTO

京都大学工学部 清水義彦 Yoshihiko SHIMIZU

Flow with small relative submergence has different turbulent structure from that with sufficient submergence, particular in the vicinity of the bottom, affected by vortex-sheddings from individual roughness elements, and it might play a role on fluvial process in mountain streams. Turbulence measurements clarifies that uniformization of mean velocity profile and suppression of turbulence intensity and Reynolds-stress in the "roughness sublayer", and the velocity fluctuation in this layer is characterized of inherent lower-frequency component in its spectrum and somewhat organized or periodical structure. The turbulent properties with stable organized structure such as cellular secondary currents is explained by formulating the organized fluctuation and temporal averaging, while those in the roughness sublayer, in which the organized motion is unstable or not fixed, is explained by further spatial averaging of the properties brought about by organized motion.

Keywords: turbulence, organized motion, roughness sublayer, small relative submergence

1. まえがき

相対水深の小さな流れでは、とくに河床近傍における乱流構造が相対水深の充分大きい場合に比べ著しく異なり、それが山地河川などの移動床過程に大きく影響するものと考えられる。本研究では水路実験における流れ計測から、河床近傍において平均流速分布や流れ強度の一様化、Reynolds応力の欠損を指摘し、その領域を roughness sublayer と呼んで、こうした構造の変化を検討した。すなわち、相関・スペクトル解析より、比較的周期的なそれゆえ組織だった構造を見だし、先述の特性が粗度要素からの剝離・放出渦に依存するものとの推測を確かめるとともに、安定な渦構造を伴う流れとの比較を行った。

2. 実験方法

可変勾配式の直線水路内に一様粒径のガラスビーズを粗度として横断方向に0.4m、縦断方向に4.5m程度敷きつめ、その上の流れを等流を維持した状態でエンドフローX型熱線流速計（日本科学工業（株）製）を用いて計測した。サンプリング周波数は200Hz、計測時間は45秒である。用いた粗度径は2種類（径2.95cmと1.7cm）であり、これを各々密な状態で配列して一様な河床粗度とし、これと水深との組合せから相対水深を種々変えて、その影響を検討した。また、比較のため前報で示した実験結果（粗度径1.25cm）も併せて検討した。表-1に水理条件をまとめる。

3. 実験結果とその考察

3.1 粗度近傍の流れの特徴

実験から得られた平均流速の鉛直分布の一例を粗度径で無次元化された鉛直座標を用いて図-1に示す。この際、鉛直座標系の原点

表-1 水理条件

	$1e$	$h(\text{cm})$	$U_m(\text{cm/s})$	Fr	$u_x(\text{cm/s})$	h/d
case A	0.0021	5.25	34.3	0.23	3.31	3.08
case B	0.0030	4.98	29.0	0.42	2.61	3.98
case C	0.0009	9.09	35.6	0.38	2.89	3.06

は、ガラスビーズ頂部に選定した。

同図から流速場は二つに区分され、粗度近傍ではみかけのKarman定数として0.58程度のゆるやかな速度勾配をもつ領域と、その上方で速度分布はKarman定数を0.4とした対数型で表わせる領域に分割できる。この粗度近傍の領域の厚さは粗度径(d)程度であり、そこでの流れの構造が粗度自身に強く影響される領域としてRaupachら(1980)が定義した様に"roughness sublayer", その上の領域を通常対数則で表し得るという意味で"inertial sublayer"と定義する。いわゆるNikuradseの粗面に代表される様な相対水深(h/d)の大きな流れではroughness sublayerは無視できるが、相対水深が小さくなるにつれて対数則の原点を考慮しても流速場全体をinertial sublayerとして表現することができず、roughness sublayerの存在が強調されその構造の把握が相対水深の小さい流れにとって本質的に重要であることが示唆される。

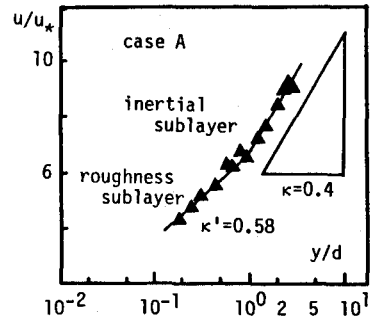


図-1 平均流速分布

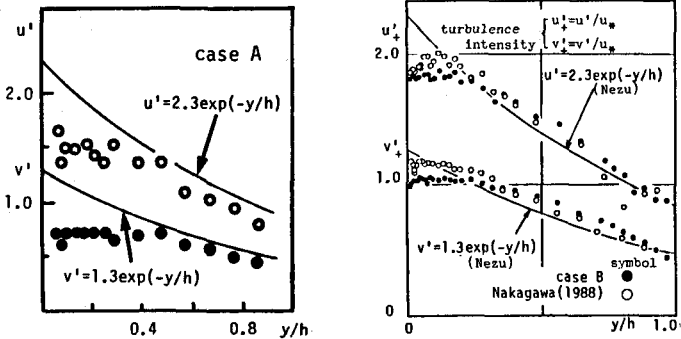


図-2 乱れ強度分布

ところで、inertial sublayerとroughness sublayerにおいて、それらの平均流速分布の勾配が異なることは、両者の間で乱れの構造が異なることを示唆する。そこで図-2に乱れ強度分布を求めてみた。縦断方向変動流速(u')の乱れ強度は河床近傍から粒径程度の高さまで一様化され、それより水面に向かって減衰する。同図に示すように、禰津(1977)の乱れ強度分布式と比較すると、その一様化傾向は相対粗度の大きい流れでは顕著に認められる。また、縦断方向変動流速(u')の乱れ強度の一様化領域は平均流速の勾配が緩やかになる領域とほぼ一致し、roughness sublayer内の乱流構造の特徴として抽出されるものと言える。同様に、鉛直方向変動流速(v')の乱れ強度も河床近傍からかなり一様化されいづれも相対粗度が大きくなるにつれて、乱れ強度の一様化領域は大きくなっている。

図-3(a)に、熱線流速計から計測されたReynolds応力分布を示す。注目すべき点は河床近傍においてReynolds応力が減少することであり、total shearを示す直線分布から欠損している。また、この欠損する領域は平均流速分布から判断されるroughness sublayer内にほぼ対応している。一般に縦渦などの水深規模の二次流をもつ流れ場では、平均流速分布の折れ曲がりやReynolds応力の直線分布からの変形が局所的に見られるが、roughness sublayer内の流れ場で、場所的な非均質性は見られないのが特徴である。

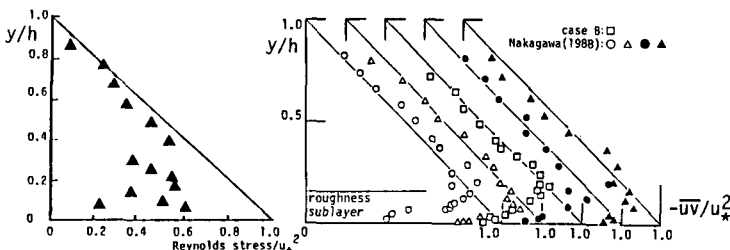


図-3(a) Reynolds応力分布

図-3(b) Reynolds応力分布¹⁾

この様なReynolds応力の欠損域は、栈粗度上の流れや粗度高さの大きい風洞乱流からも計測されているが、熱線流速計では粗度近傍のデータにばらつきが大きいものの、レーザー流速計によって計測された図-3(b)からは、その減少傾向は明瞭に読み取れている。

3.2 roughness sublayerの組織的構造

前述の検討より、河床近傍ではinertial sublayerとは明らかに異なる、粗度によって支配された乱流構造が見いだされた。この様な領域は、例えば、O'Loughlin(1969)や水山(1977)らによって平均流の考察からいずれも粗度要素による付加的な混合領域として説明され、また、栈粗度や人工粗度を用いた流れの可視化から粗度要素から放出された擾乱渦の混合過程が見いだされている。こうしたことを踏まえ、roughness sublayerの流れは粗度近傍の剝離渦などの比較的組織だった構造の影響を受けているという観点から、roughness sublayerにおける流速変動の組織性について検討を行った。

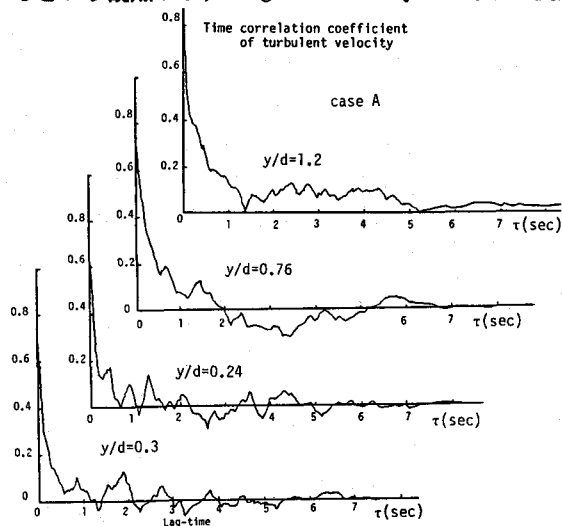


図-4 縦断方向変動流速の自己相関係数

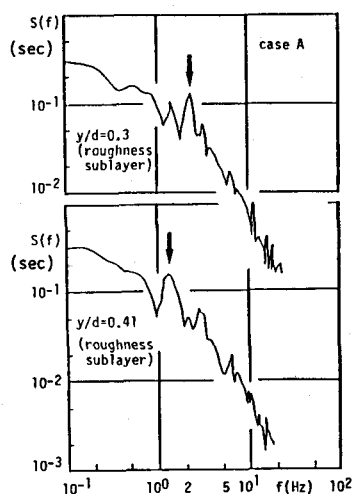


図-5 スペクトル波形

図-4に変動流速成分の自己相関係数の代表例を河床からの無次元距離(y/d)を変化させて比較した。自己相関係数が最初に τ 軸を横切る点を渦スケールの目安としてみれば、それは河床から離れるに従って大きくなるが、着目すべき点は河床近傍の場合である。すなわち、 $y/d=0.24$ 及び 0.30 における自己相関係数は通常の乱れに代表される指数関数的な減衰性と周期的な変動波形が重ね合わされた形となることである。逆に、この周期的な変動波形は、inertial sublayerにおいては次第に消滅してくる。このことから周期的な波形成分は粗度要素によって生じた周期的な剝離渦が抽出されたものであり、その組織構造がroughness sublayer内の乱流構造を特徴づけるものとの推測が支持される。

図-5にroughness sublayerにおける縦断方向変動流速成分のスペクトル分布(乱れ強度で規格化したもの)の代表例を示す。同図から明らかに3Hz程度の卓越周波数が見られる。ところで、Karman渦のような周期的な剝離渦は、Strouhal数で 10^{-1} 程度の低周波数成分で規定されるが、例えば同図の場合3Hzの卓越周波数とそこでの平均流速を用いたStrouhal数は0.21程度となり、オーダー的にそれと一

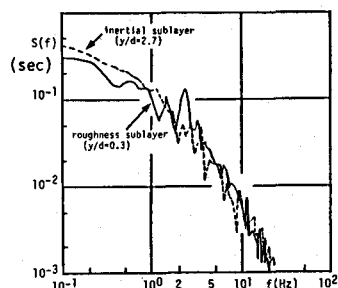


図-6 スペクトル波形の比較

致する。図-6, 7にはroughness sublayerとinertial sublayerの縦断方向変動流速のスペクトル波形を、図-8には鉛直変動流速のスペクトル波形を重ねあわせて比較してみる。これからもroughness sublayer内のスペクトルには1~4Hz程度の卓越周波数が見られ、しかもそのスペクトルはinertial sublayer内のスペクトルに比べ、 10^0 のオーダーの周波数領域での貢献が卓越していることが認められる。この特徴は縦断及び鉛直方向の変動流速のスペクトルとも見られる。先に求めた自己相関係数の特徴と併せると、粗度要素によって生じた低周波な周期的vortex-sheddingsがroughness sublayer内の乱流構造を決定しているものと考えられる。

以上より、粗度要素から放出される渦が流れ構造の変質に大きな影響を与えているものとの確信を強めた。

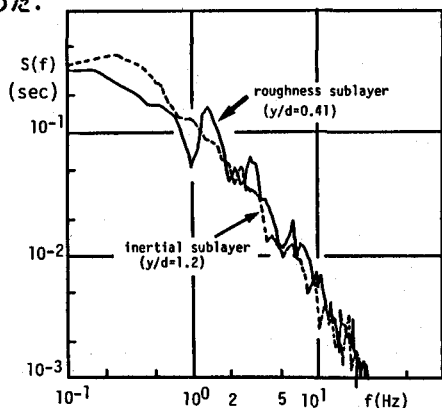


図-7 スペクトル波形の比較

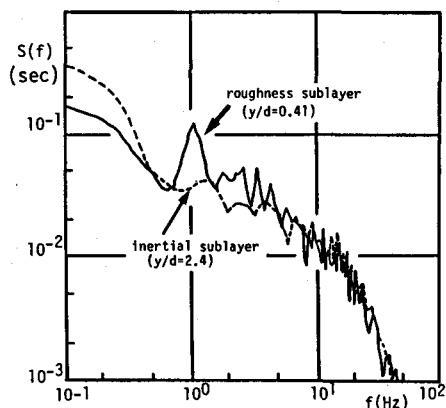


図-8 スペクトル波形の比較

4. 明瞭な渦構造を伴う流れとの比較

本実験のように一様な粗度を密な状態で配列させた流れ場では、前述した平均流速分布や乱れ諸量の特性が平面位置もしくは粗度との相対位置にかかわらず抽出される。図-9及び10は、粗度との相対位置を種々かえて測定されたReynolds応力分布と平均流速分布であるが、河床近傍での速度勾配の緩和やReynolds応力の欠損は常に生じ、流れ場の二次元性が認められる。すなわち、流れ構造に対する粗度要素からの渦の貢献が大きいにもかかわらず、流れ場は”均質な場”といえる。

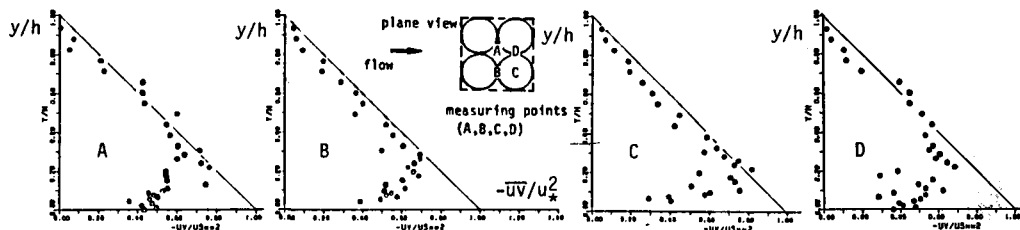


図-9 測定位置を変えて計測されたReynolds stress分布

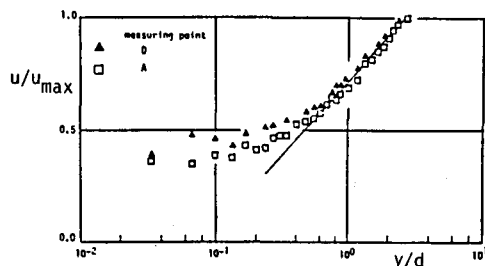


図-10 測定位置を変えて計測された平均流速分布

一方、縦渦などの安定した二次流では、図-11に示すようにその上昇・下降に応じて、平均流速分布の折れ曲がりやReynolds応力分布の凹凸状変化が見られる。すなわちこのような流れ場では流れ構造の場所的不均質性が明瞭で、前者の“均質”な流れ場とは性質を異にする。

いま、流速場を次の様に分割して考えるものとする。

$$u = U + \bar{u}_s + u_s' + u_T' \quad (1)$$

$$v = \bar{v}_s + v_s' + v_T' \quad (2)$$

ここで、 u は縦断方向、 v は横断方向流速成分であり、添字 S は木谷(1988)の定義の様に、乱流成分のうち組織構造を有する成分、添字 T は組織構造を持たないランダムな成分を意味する。

また、時間平均と空間平均操作を次の様に表現し、例えば、縦断方向流速成分(u)に施すと

$$\bar{u} = U + \bar{u}_s \quad (-: \text{time-averaged}) \quad (3)$$

$$\langle \bar{u} \rangle = U \quad (< >: \text{spatial averaged}) \quad (4)$$

となる。点計測されるReynolds応力は上記の方法によれば、

$$\begin{aligned} -\rho \langle \overline{u'v'} \rangle_{\text{measured}} &= -\rho \{ \langle (\bar{u} - \bar{u}_s)(\bar{v} - \bar{v}_s) \rangle \} \\ &= -\rho \langle \overline{u'_s v'_s} + \overline{u'_T v'_T} \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

となる。但し、添字 s と T の諸量の間には相関は無視されるものとする。一方、実質的な運動量フラックス (total shear)は、

$$\begin{aligned} \tau &= -\rho \langle \overline{uv} \rangle \\ &= -\rho \langle \overline{(U + \bar{u}_s + u_s' + u_T')(\bar{v}_s + v_s' + v_T')} \rangle = -\rho \{ \overline{Uv_s} + \overline{u_s v_s} + \langle \overline{u'v'} \rangle_{\text{measured}} \} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。例えば、横断方向に水深スケール程度の間隔をもって粗・滑面を繰り返す人工粗度上の流れでは、安定な縦渦が場所的に固定化されるため、式(6)より $\bar{v}_s$ の符号に応じてReynolds応力分布に凹凸形状が出現する。平均流速場にも粗面上では下降流によって高速域($\bar{u}_s > 0, \bar{v}_s < 0$)滑面上では上昇流によって低速域($\bar{u}_s < 0, \bar{v}_s > 0$)が現れ、流れ場の不均質性は明瞭となり図-11(a)の様なReynolds応力分布や平均流速分布が横断方向に繰り返される。一方、同じ人工粗度上であっても粗・滑面の配列スケールによって不安定な縦渦が形成されるが、この場合縦渦の位置も不安定になるため、点計測では不均質性が薄れる傾向にある(図-11(b)参照)。すなわち、縦渦位置の変動により空間平均されたものが計測されるため v -分布は微弱になる一方、Reynolds応力分布・平均流速分布には高速域の特徴が見られなくなる。roughness sublayerにおける流れはさらに組織構造が安定せず、不安定な縦渦を伴う流れで見られた傾向が強調される。すなわち、もはや場所的不均質性はなくなる。渦構造が不安定あるいは渦運動の位置が場所的に固定化されない場合に点計測されるReynolds応力は次のようになる。

$$\begin{aligned} \langle \tau \rangle &= -\rho \langle (\overline{U + \bar{u}_s}) \bar{v}_s + \langle \overline{u'v'} \rangle_{\text{measured}} \rangle \\ &= -\rho \langle \overline{u_s v_s} \rangle - \rho \langle \langle \overline{u'v'} \rangle_{\text{measured}} \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

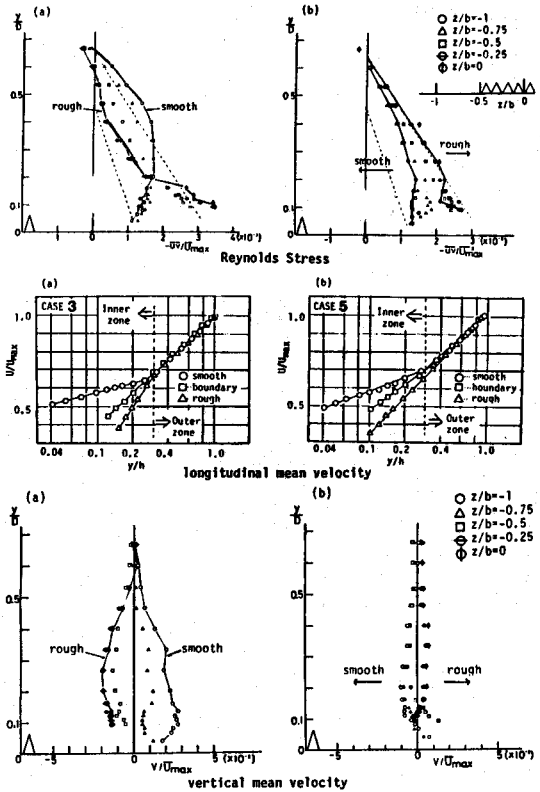


図-11 縦渦を伴う人工粗・滑面上の流れ場 (中川ら(1981))

ここで、 $\overline{u_s}$ 、 $\overline{v_s}$ は連続の条件から空間的に正・負をとるが、その積は負となる。このときReynolds応力分布はその位置にかかわらず、せん断応力の直線分布からしかも組織的構造を有するroughness sublayer内において常に欠損することになる。

以上を図-12にまとめ、安定・不安定な縦渦とroughness sublayerの流れ場の対応を模式的に示した。

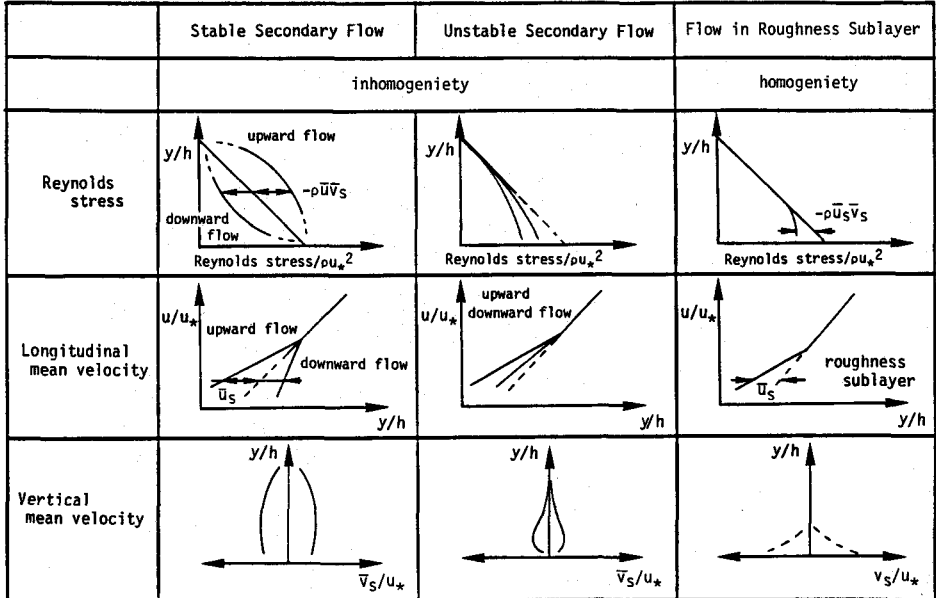


図-12 安定・不安定な縦渦を伴う流れとroughness sublayerの流れとの対応

5. あとがき

相対水深の小さい流れでは、平均流速分布が河床近傍において、通常対数則では表現できない領域としてroughness sublayerが出現する。本研究においては、その内部の乱流構造が粗度要素からの”vortex-sheddings”にどのように影響されたかを考察・検討した。今後はこうした考察を相対水深の小さな流れでの移動床過程に結びつけていきたいと考えている。

参考文献

1. 中川・辻本・清水・村上：礫床河川の流砂過程解明に果たす流れ構造の意義，第32回水理講演会論文集，1988，pp.535-540.
2. 福津家久：開水路乱流の乱れ強度に関する研究，土木学会論文報告集，第261号，1977，pp. 67-76.
3. M.R.Raupach, A.S.Thom and I.Edwards: A wind-tunnel study of turbulent flow close to regular arrayed rough surface, Boundary-Layer Meteorology,18,1980.
4. O'Loughlin, E.M. and V.S.S. Annambhotla: Flow phenomena near rough boundaries, Jour. of Hydraulic Res., Vol.7, No.2, 1969, pp.231-250.
5. 水山高久：山地河川の掃流砂に関する研究，京都大学学位論文，1977.
6. 中川・福津・富永：各種河床条件における縦渦を伴う流れの乱流構造，京都大学防災研究所年報第24号B-2,1981,pp.315-338.
7. 木谷 勝：乱流モデルと乱流構造，土木学会夏期研修会テキスト，1988,pp.A-6-1~15.