

## II-183 開水路粗度急変部の乱流構造

京都大学大学院 学生員 ○ 神田 佳一 京都大学防災研究所 正員 村本 嘉雄  
京都大学防災研究所 正員 藤田裕一郎

1. はじめに：護床工等の河川構造物周辺部の水理を明らかにするために、開水路粗度急変部における水面形、流速分布及び乱れ特性の変化過程について、これまで実験と $k-\varepsilon$ モデルの適用性について考察してきた。<sup>1)</sup>

2) 本報では、粗度急変部における乱れ構造の変化特性について詳細に検討するとともに、遷移長について従来の実験結果と合わせて考察する。

表-1 実験条件

| 実験<br>番号 | 粗度<br>条件 | 河床<br>勾配<br>i | 流量<br>Q (l/s) | 下流部<br>等流水深<br>h <sub>2</sub> (cm) | 下流部流部<br>摩擦速度<br>U <sub>*2</sub> (cm/s) |
|----------|----------|---------------|---------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| Run1     | 粗→滑      | 1/500         | 3.75          | 2.54                               | 2.08                                    |
| Run2     | 滑→粗      | "             | 4.00          | 3.98                               | 2.55                                    |

2. 実験概要：実験は、幅40cm、長さ15mの長方形断面水路を用い、半球粗度路床(相当砂粒粗度高さ $k_s=0.9$ cm, 粗度係数 $n=0.02$ )とその上流あるいは下流区間に木製ペイント塗装の滑面( $n=0.01$ )を配した。粗度基面は流速分布の測定結果から半球の頂点と判断し、滑面の高さをそれと一致させた。流速の測定には2方向熱膜流速計を用い、サンプリング周波数 $f=108$ HzでA/D変換した後、統計処理を行った。実験条件は表-1に示す通りで、いずれも常流状態である。

3. 水面形と流速分布：図-1に水面形及び流下方向流速 $u$ の等値線図を示す。図中の $x$ は粗度変化点からの流下距離、 $z$ は粗度基面からの鉛直距離である。下流端水位の調節により、いずれも下流区間でほぼ等流状態が得られた。Run1(粗→滑)では粗度変化点近傍で流下方向に定常な水面波が生じており、流速の加速・減速の繰り返しが顕著である。一方、Run2(滑→粗)では粗度変化点近傍でも流れは滑らかに接続しており、流速は底面から徐々に減少していき新たな内部境界層<sup>3)</sup>の発達がみられる。

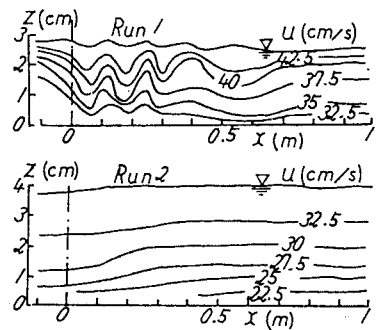


図-1 等流速線図

4. 乱れ強度とレイノルズ応力：下流等流部の摩擦速度 $U_{*2}$ で無次元化した乱れ強度 $u'$ (流下方向)、 $w'$ (鉛直方向)及びレイノルズ応力 $-u'w'$ の鉛直分布の流下方向変化を図-2, 3に示す。図より $u'$ ,  $w'$ 及び $-u'w'$ は、Run1, Run2共に粗度変化直後に底面近傍で急変し、流下するに従ってそれが上方へ伝播しているのがわかる。これは粗度変化に伴う速度勾配の変化によるもので、内部境界層を新たな粗度に対応した渦の伝播領域と見なせば、粗面から滑面に変化する場合にも内部境界層が定義できよう。

## 5. 乱れのパワースペクトルとエネルギー

収支：図-4は $z=0.7$ cmにおける $w'$ のパワースペクトル $S_z$ の変化を示したものである。Run1においては、 $x$ の増加に伴い高周波の渦が卓越し粗面から滑面に移行するにつれて渦径が細分化されており、Run2ではその逆の傾向が見られる。図-5は乱れのエネルギー収支式((1)式)の各項を、 $x=4$ cm, 10cm及び70cmの各断面で比較したものであり、各項とも $U_{*2}/h$ で無次元表示している。Run1については $k-\varepsilon$ モデル<sup>1)</sup>を適用したシミュレーション結果も示した。ただし、逸散率 $\varepsilon$ は左辺の3項の総和より求めた。

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + u'w' \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial kw}{\partial z} = -\varepsilon \quad (1)$$

ここに、 $k$ は乱れエネルギー ( $\approx 3/2 \cdot (u'^2 + w'^2)$ )

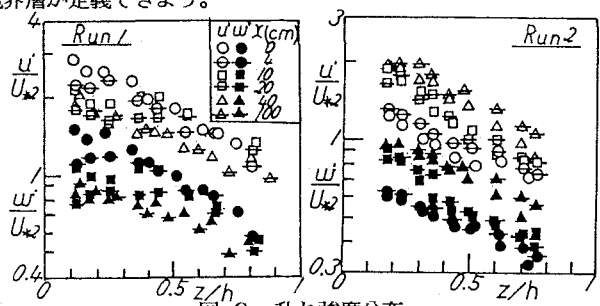


図-2 乱れ強度分布

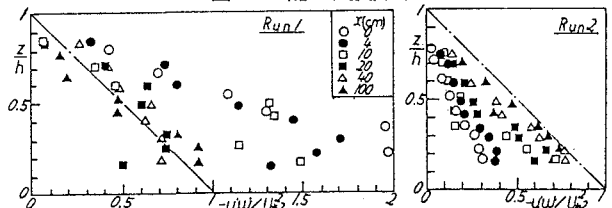


図-3 レイノルズ応力分布

+ $w^2$ ))である。この図より次のことがわかる。(i)  $x=4\text{cm}$ ではRun1、Run2共に移流項の占める割合が最も大きくなっている。これは図-2から明らかなように乱れエネルギーの変化の大部分が粗度変化点近傍特に $x=0\sim 10\text{cm}$ の区間で生じているためであり、主としてこの移流によるエネルギーの移動が粗度急変流の内部機構を特徴づける要因となっていると考えられる。(ii) 拡散によるエネルギーの移動も卓越している。Run1では特に粗度変化点直下流において、底面近傍ではエネルギー損失、流心部ではエネルギー生成の大きな部分を拡散項が占めており、鉛直方向に強い混合が生じていることがわかる。一方、Run2では $x=10\text{cm}$ で拡散項が卓越し、平均流によるエネルギーの生成量を上回っている。移流項が流下するに従い急激に減少するのに対して、拡散項は底面近くで減少しているものの流心部ではむしろ増加傾向にあり、この拡散による鉛直方向への乱れの伝播によって内部境界層が形成されることを示している。(iii) 粗度変化点直下流における移流項の存在が流れを特徴づけることはすでにのべたが、計算では $x=4\text{cm}$ で早くも移流項は無視できるほど小さくなっている。これは、底面せん断力の境界条件を粗度変化点で $u_{\tau 1}$ から $u_{\tau 2}$ に不連続に変えたためであって、 $x=1\text{cm}$ では計算結果でも大きかった。しかしながら、拡散項は定量的にも実験結果とよく一致しており、粗度変化点及び水面等の境界条件の取り扱いに課題が残されているが、 $k-\epsilon$ モデルの有用性は評価されよう。

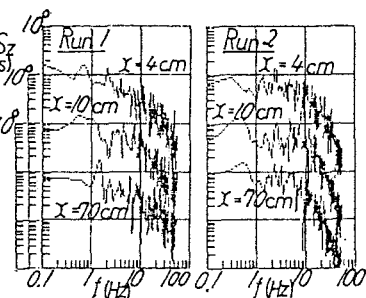


図-4  $w^2$ のパワースペクトル

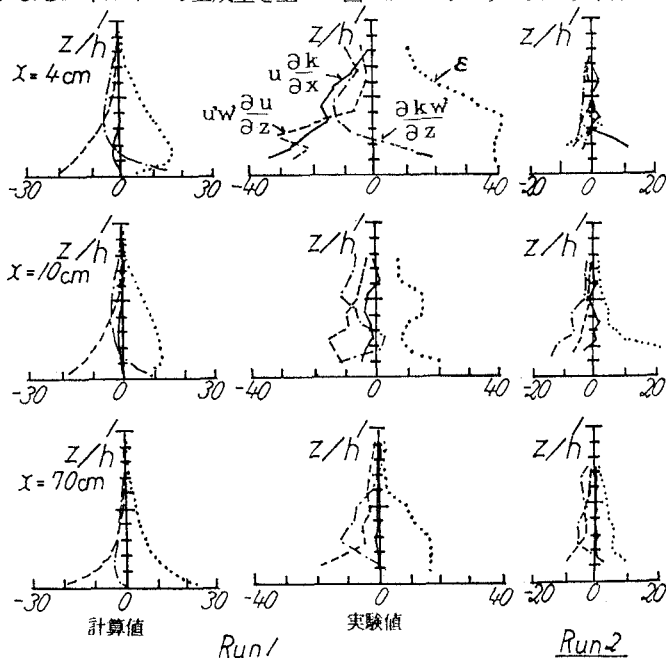


図-5 エネルギー収支

**6. 遷移長さ：**流速及び乱れ強度に注目して、一様領域への遷移長さ $L$ と下流部等流水深 $h_2$ の比を粗度変化点上・下流部の粗度係数の比 $n_1/n_2$ で整理すれば、図-6 のようである。同図には田中<sup>(4)</sup>による六脚ブロックを用いた実験及び棧間隔の異なる2種の棧粗度を用いた神田<sup>(1)</sup>の実験結果も示した。図より、いずれの場合も流速の遷移区間は乱れ強度のそれに比べて短く、 $n_1/n_2$ が1に近づくほど $L/h_2$ は単調に減少している。また一定の $n_1, n_2$ に対して、 $n_1 > n_2$ の場合には $n_1 < n_2$ のときよりも遷移区間が長くなることがわかる。

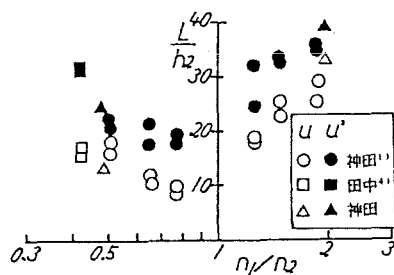


図-6 遷移長と $n_1/n_2$ との関係

**7. おわりに：**粗度急変部の乱れ構造に関する実験結果について述べ、その特徴を明らかにした。これらの結果に基づいて、今後実験現象との対応を明確にした上で、流砂の挙動について検討していきたい。最後に、実験とその整理に助力して頂いた京都大学大学院生、大坪 高君に謝意を表します。

【参考文献】1) 神田・四倉：第42回年講第2部，1987。2) 村本・藤田・神田・大坪：昭和62年度関西支部年講，1988。3) 村重・松梨・吉川：土木学会論文報告集，第261号，1977。4) 田中：豊橋技術科学大学修士論文，1984。