

# 開水路断面変化部における流れの水理特性について(2)

## —水路幅急変部に関する実験的検討—

今本博健・藤井良啓・藤井義文

### ON THE CHARACTERISTICS OF AN OPEN CHANNEL FLOW THROUGH PASSAGE OF CROSS-SECTIONAL VARIATION(2)

—Experimental Investigation of an Open Channel Flow  
through Passage of a Sudden Expansion or Contraction—

By *Hirotake* IMAMOTO, *Yoshihira* FUJII and *Yoshifumi* FUJII

#### Synopsis

This paper deals with the characteristics of an open channel flow around a sudden width-expansion or -contraction. The velocity measurements are carried out with a hot-film flowmeter and a propeller flowmeter. Three dimensional distributions of mean and turbulent velocity, the energy and the momentum coefficients, the Reynolds stress are obtained experimentally. Some interesting results about the bed-variation around a sudden width-expansion or -contraction are obtained experimentally.

Main results obtained through experimental investigations are as follows; 1) The characteristics of mean velocity distribution depend on the expansion or contraction ratio and the kind of flow transition, that is, sub-critical or supercritical transitions. 2) The energy and the momentum coefficient of flow in transition have values more than unity. 3) The existence of spiral motion is found in the flow through the section of sudden contraction. 4) The energy spectrum of turbulence show the existence of the inertial sub-range which is described by the power law of  $-5/3$ .

#### 1. はじめに

断面急変部における開水路流れの水理特性を明らかにするための基礎として、著者らは、従来より種々の断面変化部を対象として実験的検討を行っているが<sup>1)</sup>、本報告では、水路幅が急激に変化する急拡部および急縮部を取り上げ、乱流構造をも含めた内部構造に関して実験的検討を行うとともに、移動床における若干の実験的検討を加えたものである。

水路幅急変部の水理特性については、従来より Rouse<sup>2)</sup>, Ippen<sup>3)</sup>, Formica<sup>4)</sup>, 芦田<sup>5)~7)</sup>, 石原・志方<sup>8)9)</sup>らにより研究が進められ、多くの興味ある成果が得られているが、不明の点もなお多く残されている。また、水路幅急変部の河床変動についても、室田<sup>10)</sup>, 杉尾<sup>11)</sup>, 芦田<sup>12)13)</sup>, 道上<sup>14)</sup>らにより、多くの理論的かつ

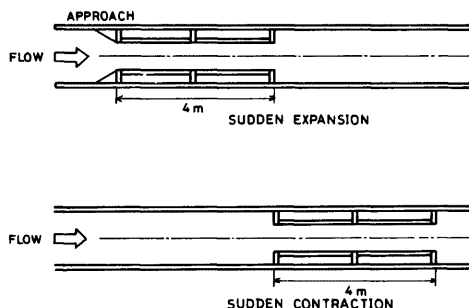


Fig. 1. Schematic illustration of experimental instrument.

実験的研究が行われているが、流れの内部構造すなわち速度場の特性との関連について述べられているものは数少ない。

水路幅急変部では流れが3次的に変化するため、現象もそれに応じて3次的に把握する必要がある。したがって、本研究では、2成分ホットフィルム流速計を用いた速度計測により平均および乱れ速度場の特性を実験的に明らかにするとともに、水路幅変化部周辺の河床変動と平均速度分布との関連について実験的検討を加えたものである。

## 2. 実験装置および方法

実験水路は宇治川水理実験所に設置された乱れ計測用水路である。

本実験水路は、長方形断面一様水路であるため、Fig. 1 に示されるように、長さ 2m、幅 12cm、厚さ 1.6cm のアクリル樹脂板を縦に2枚つらねたものを、側壁と平行に1対設置することにより、急拡部あるいは急縮部として使用されている。アクリル板の間隔を変化させることにより、水路幅変化比は容易に変えられる。

なお流下方向成分のみの速度計測にはプロベラ流速計が、また3次的速度成分の計測には2成分用ホットフィルム流速計が用いられた。ただし、乱れ速度のスペクトル特性については1成分用ホットフィルム流速計が使用された。

## 3. 平均速度場の特性

### 3.1 平均速度分布

本実験では、水路幅変化比が 30 : 40, 20 : 40, 10 : 40 の3種の場合を対象とし、路床勾配  $I_b$  は  $I_b = 1/800$  の一定に保たれている。なお、常流遷移の実験については、流量  $Q=2l/sec$  で、下流端の水位調節により急変部での水深を 5cm とし、また射流遷移の実験については、流量  $Q=4l/sec$  とし、両者についてプロベラ流速計を用いた速度計測が行われた。

速度計測は、速度場の3次的特性が把握されるように一定間隔の格子点で行われている。また、データは、サンプリング周波数  $f_s=3.2Hz$ 、データ数  $N=100$  個で処理されている。

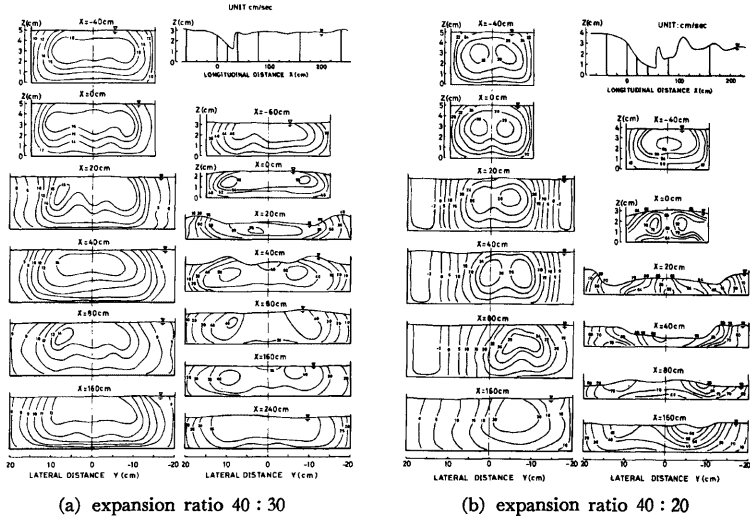


Fig. 2 は、急拡部周辺の平均速度分布を等値線で表わし、その流下方向の変化状況を示したものである。図より、平均速度分布は拡大比の変化により種々の様相を呈することが知れる。すなわち、下流端の水位調節のない射流遷移の場合には、いずれの拡大比においても急拡部周辺に速度の大きい部分が2つ生じ、いわゆる双頭峰（double peak）を形成するが、下流端の水位調節のある常流遷移の場合には、拡大比によっては必ずしも双頭峰は形成されず、拡大比の増大に伴い偏流効果も著しくなる。

このような水路幅変化比の変化に伴う速度分布形の変化は、Fig. 3 に示された急縮部の場合にはさらに著しい。すなわち、縮小比 30 : 40 では射流および常流遷移のいずれについても、急縮部上流側で流れが中央部に集中し、下流側で一旦両側壁側へと分離した後、流下に伴い速度分布形は開水路一様流れの状態に回復していく様子が見られる。また、20 : 40 では、急縮部上流側で水路中央部に集中した流れと、急縮部エッジ付近に集中する流れとにより、速度の大きい部分が3つ生じ、この影響は下流にも残るが、この現象は、常流・射流のいずれの遷移についても見られる。さらに、10 : 40 では、速度分布形は非常に複雑で速度の大きい部分が2つ現われるものの、その配置は横方向のみならず縦方向に並ぶ断面も見られる。とくに、射流遷移でこの傾向は顕著である。なお、常流遷移では急縮部直下流の両側壁水面近傍に逆流域も現われている。

### 3.2 エネルギーおよび運動量補正係数

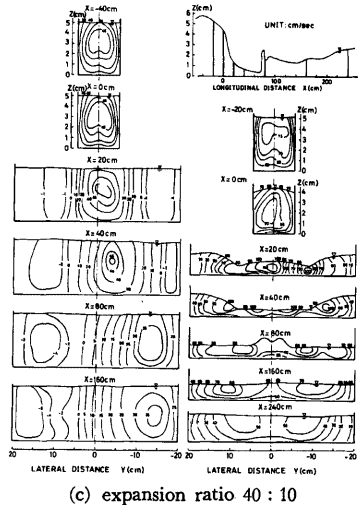


Fig. 2. Contour line of mean velocity of flows around sudden expansions.

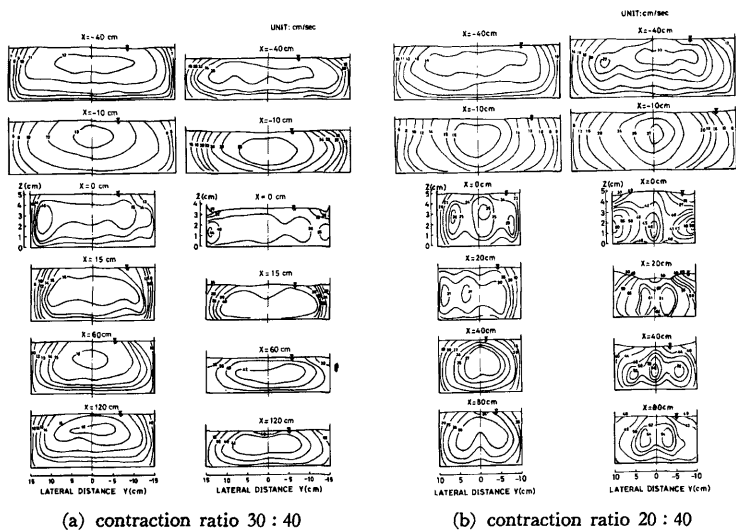


Fig. 3. Contour line of mean velocity of flows around sudden contractions.

側で再び増加する場合も見られるが、これは跳水直後の速度分布形が跳水前の射流部分の影響によりひずむためと考えられる。

一方、Fig. 5 は急縮部の場合であるが、図より急縮部への接近に伴い補正係数が増加する傾向が見られ、

1 次元解析においては、式の簡略化のため補正係数  $\alpha$  および  $\beta$  は 1 と近似される場合が多いが、上述のように水路幅急変部周辺の速度分布形はかなり複雑で、補正係数の値はもはや 1 とは近似し得ない。そこで、3.1 の速度分布形より次の定義式にしたがい数値積分を行い、 $\alpha$ 、 $\beta$  を試算した。

$$\alpha = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{U}{U_m} \right)^3 dA \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{U}{U_m} \right)^2 dA \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $U$ ：局所的平均速度、 $U_m$ ：断面平均速度、 $A$ ：流水断面面積であって、 $A$  としは死水域を除いた有効通水断面および逆流域をも考慮した全断面（図中に  $\alpha'$  あるいは  $\beta'$  とし示されている。）の双方で検討がなされている。

Fig. 4 は、急拡部周辺における  $\alpha$ 、 $\beta$  の流下方向分布を示したものである。図より、急拡部上流側では  $\alpha$ 、 $\beta$  はいずれもほぼ 1 として差支えないが、下流側では増大しとくに常流遷移の場合その傾向が著しい。また、拡大比の変化に対し、射流遷移ではその値はあまり変化しないものの、常流遷移では、 $A$  として全断面をとった場合、拡大比の増加に伴いその値も増加することが知れる。なお、射流遷移ではかなり下流

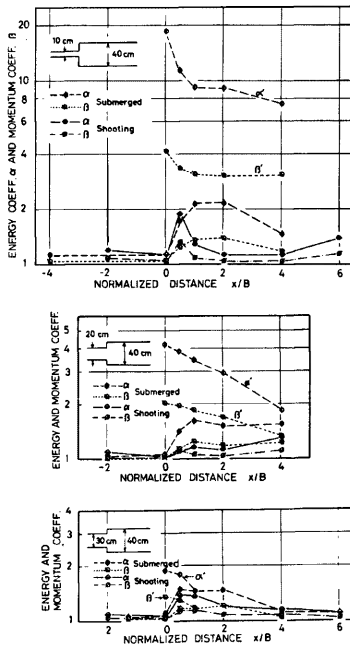


Fig. 4. Longitudinal distribution of energy and momentum coefficient  $\alpha$ ,  $\beta$  around sudden expansion.

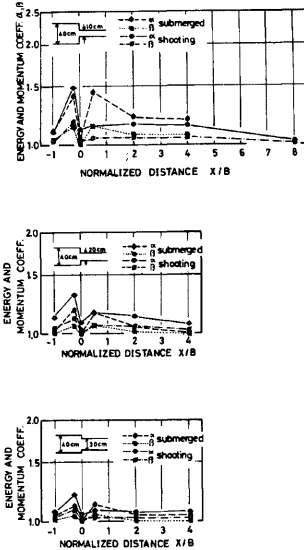


Fig. 5. Longitudinal distribution of energy and momentum coefficient  $\alpha$ ,  $\beta$  around sudden contraction.

急縮部で激減してほぼ 1 となり、さらに下流側で再び増加したのち徐々に減少することが知れる。また、最大値は縮小比あるいは遷移状態の変化にそれほど影響されないことも知れる。

### 3.3 平均速度場の 3 次元特性

本実験は、20:40 の拡大比および縮小比を対象とし、路床勾配を水平、流量  $Q=1\text{ l/sec}$  で下流端の水位調節により水深  $h=4\text{ cm}$  とした場合について行われたものである。なお、データ処理はサンプリング周波数  $f_s=20\text{ Hz}$  でデータ数  $N=500$  個として行われている。

Fig. 6 は急拡部周辺の平均速度分布を流下方向成分  $U$  については等値線で、水平成分  $V$  および鉛直成分  $W$  についてはその合成ベクトルで示したものである。

本実験で得られた  $V$  および  $W$  はただか 1 cm/sec 程度であるため、定量的な信頼性には若干の疑問が残るものの定性的な特性は論じられるものと考えられる。すなわち、急拡部上流側の  $x=-40\text{ cm}$  では、水路中央部の  $U$  の大きい領域より下方とくに両側壁底部に向う流れが存在し、この流れは水路側壁に沿って上昇し、再び  $U$  の大きい領域にもどると考えられる。下流側では、 $x=20\text{ cm}$  の断面で中央の  $U$  の大きい領域より外側に向け放射状に広がる流れが存在し、そのまま逆流域への流体補給が行われている。また、右岸側においては水面付近で逆流域からの逆補給の傾向もうかがわれる。さらに、 $x=160\text{ cm}$  の断面にお

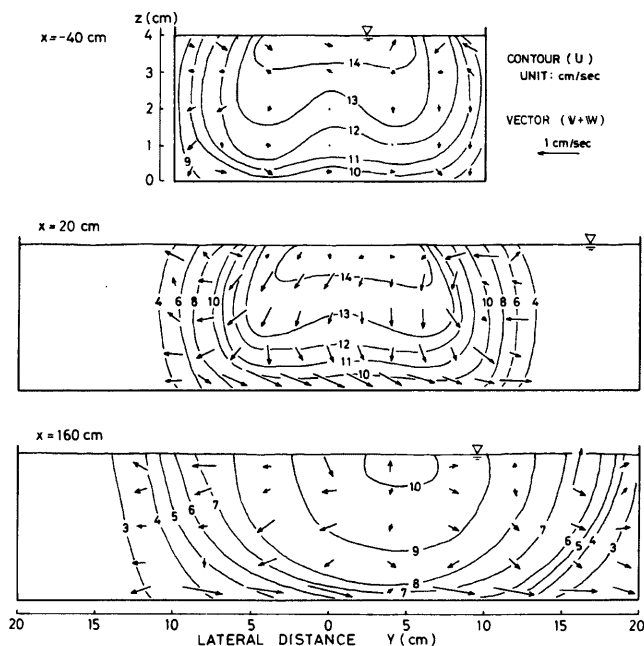


Fig. 6. Contour line of  $U$  and vector of  $V$  and  $W$  around sudden expansion.

でも放射状の流れが存在し、急拡大下流側における流れの拡大をうかがうことができる。なお、 $x=20, 160$  cm の両断面における路床付近での右岸側に向う顕著な流れは偏流効果と密接な関係があり、その影響が底部で顕著に現われることを意味するものと考えられる。

また、Fig. 7 は急縮部の場合であって、 $x=0$  cm の断面のみ  $V$  および  $W$  のスケールが他の  $1/5$  となっている。

図より、 $x=-40$  cm の断面ではまだ急縮部の影響が現われていないが、 $x=-15$  cm ではかなり顕著に現われており、流れが水路中央部に向うとともに  $U$  の等値線にもひずみが生じ始めている。 $x=0$  cm の断面では、 $U$  および  $W$  は側壁付近でもっとも大きく、水路中央部では上昇流となっている。この中央に向う流れが再び両側壁に向け分離していく様子が  $x=20$  cm の断面に見られ、左岸側ではこの流れが路床に沿い再び中央に向う傾向も見られる。 $x=80$  cm の断面では、 $V$  および  $W$  ともに小さくなり、再び長方形断面開水路一様流れの状態に回復していく様子がうかがわれる。

#### 4. 乱れ速度場の特性

##### 4.1 乱れ速度分布

Fig. 8 は、急拡大部周辺の乱れ速度の各方向成分  $u'$ ,  $v'$  および  $w'$  の横断分布を示したものである。図より剥離境界面付近で乱れがとくに増大することが認められる。また、3者の分布形はほぼ相似となってお

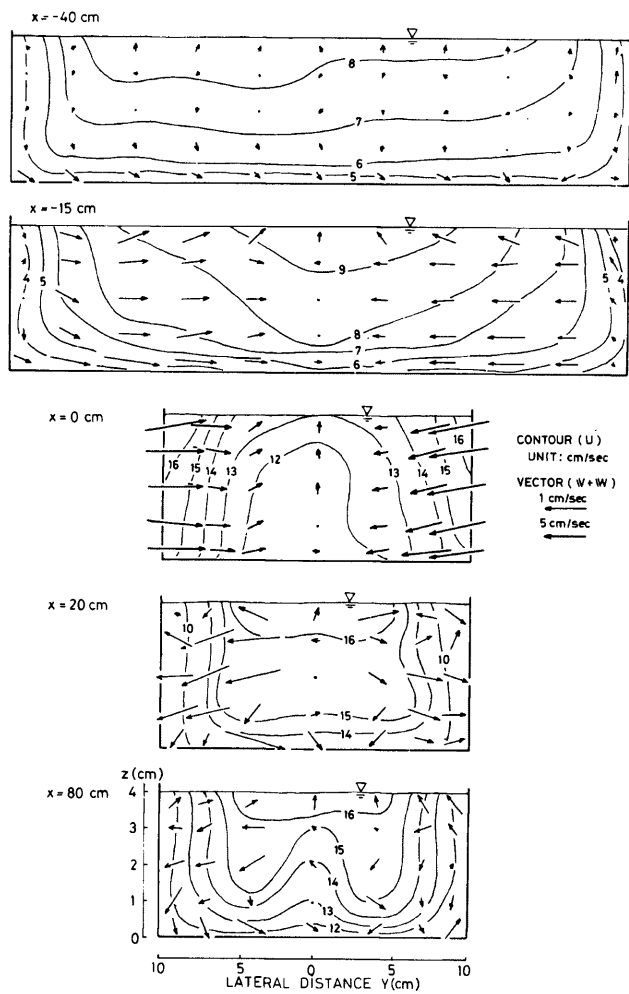


Fig. 7. Contour line of  $U$  and vector of  $V$  and  $W$  around sudden contraction.

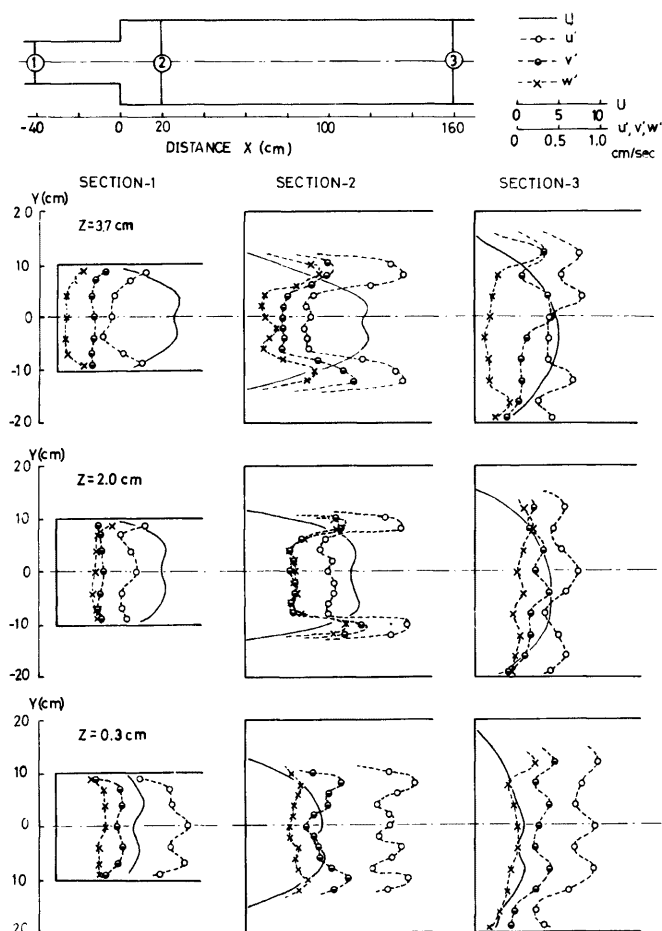


Fig. 8. Distribution of turbulent velocity component  $u'$ ,  $v'$  and  $w'$  around sudden expansion.

り、いずれの断面においても  $u' > v' > w'$  の大小関係がある。このような乱れ速度のある方向成分の流下方向の変化率が、他の成分のそれに比し著しく増大あるいは減少することがないという事実は、後述のように乱れ速度成分をもっとも卓越した  $u'$  で代表させ、乱れ速度あるいは乱れエネルギーの分布特性を検討する上で非常に好都合である。また、断面ごとの分布形を見ると、 $x=40$  および  $20$  cm の断面では路床付近ほど乱れが大きいのに対し、 $x=160$  cm では乱れは断面内ではほぼ一様分布となっていることが知れる。

同様に、急縮部の場合を示したものが Fig. 9 であって、 $x=0$  cm の断面を除きいずれもその分布形はほ

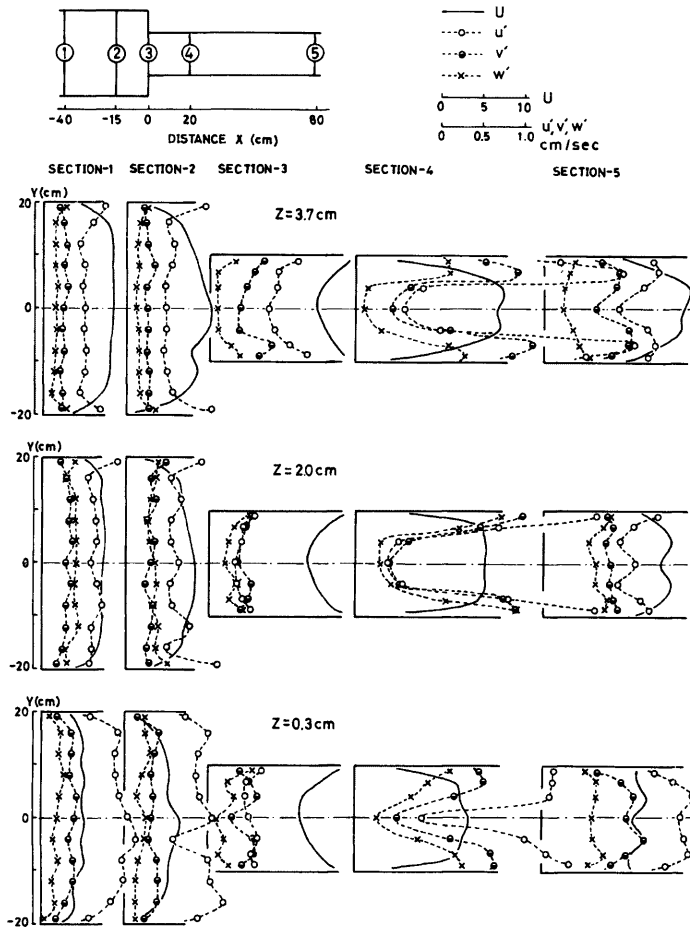


Fig. 9. Distribution of turbulent velocity component  $u'$ ,  $v'$  and  $w'$  around sudden contraction.

ば相似となっており、 $u' > v' > w'$  の大小関係があることは急拡大の場合と同様であるが、 $x=0$  cm では、表面付近を除き  $v'$  および  $w'$  はともに  $u'$  と同程度の大きさとなっている。また、乱れ速度の流下方向の分布は、急縮部上流側では断面内でほぼ一様となっているが、急縮部直下流では両側壁付近で非常に大きくなっている。これは、急縮部のエッジ付近で発生した乱れ、および急縮部直下流に形成された剥離域より離脱した乱れの影響と考えられるが、この乱れは流下とともに徐々に一様分布となることが知れる。なお、

Table 1. Percentage of turbulent energy component.

| $x(\text{cm})$ | $E_{tw'}$ | $E_{tv'}$ | $E_{tw''}$ | $E_t(\%)$ |
|----------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| -40            | 64        | 22        | 14         | 100       |
| 20             | 62        | 22        | 16         | 100       |
| 160            | 60        | 28        | 12         | 100       |

$x=-15\text{cm}$  の断面では、両側壁付近でとくに  $u'$  が大きい値となる部分も見られるが、これは急縮部上流側に形成される剥離域の影響と思われる。

#### 4.2 乱れエネルギー分布

乱れの大きい領域では、エネルギーの変換機構を論ずる上で速度の乱れ成分が持つエネルギーを無視できない。

いま、ある断面を通過する単位時間当りの平均および乱れ速度のエネルギーは次式で表わされる。すなわち、

$$E_m = \frac{\rho}{2} \int_A U^2 dA \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$E_t = E_{tw'} + E_{tv'} + E_{tw''} = \frac{\rho}{2} \int_A U(U'^2 + v'^2 + w'^2) dA \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $E_m$  および  $E_t$ ：平均および乱れエネルギーであって、 $E_t$  の添字はその乱れ成分のもつ乱れエネルギーを示す。また、 $\rho$ ：流体密度、 $U$ ：局所的平均速度、 $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$ ：局所的乱れ速度成分である。

各乱れ速度成分のもつエネルギーを比較するため、例として急拡部の場合を示したものが Table 1 であって、いずれの断面においても  $E_{tw'}$  は  $E_t$  の 60% 以上となり、乱れエネルギーのうち  $u'$  成分によるエネルギーが大半を占めることが知れる。したがって、 $u'$  のみにより乱れエネルギー分布を検討することが可能と考えられる。

Fig. 10 は、 $u'$  のみによる乱れエネルギー  $E_{tw'}$  と  $E_m$  との比を急拡部常流遷移で拡大比を変化させた場合について示したものである。図より、 $E_{tw'}/E_m$  は急拡部上流側では拡大比の変化による差が小さく、拡大比が大きいほどその値が小さいのに対し、下流側では拡大比の変化により大きく異なり、拡大比の増加に伴いその値も増加することが知れる。これは、同流量のもとでは、急拡部上流側において、乱れ速度は同程度であっても平均速度が拡大比とともに増大するのに対し、下流側では、平均速度は同程度であっても乱れ速度が拡大比とともに増大するためと考えられる。

同様に、Fig. 11 は、急縮部常流遷移について各縮小比における  $E_{tw'}/E_m$  の値を示したものである。図より、 $E_{tw'}/E_m$  は、いずれの縮小比の場合にも急縮部で一旦減少したのち下流側で増大しているが、その程度は急拡部の場合より小さい

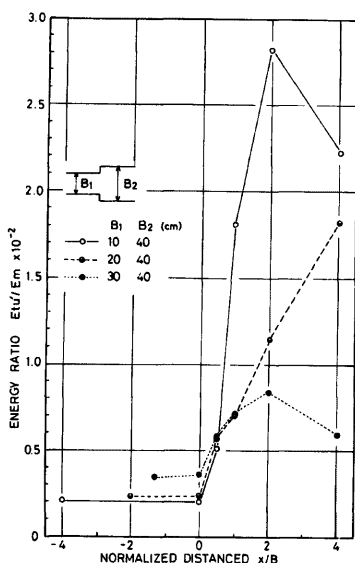


Fig. 10. Distribution of energy ratio  $E_{tw'}/E_m$  around sudden expansions.

ことが知れる。また、流下方向の変化率は、縮小比 ( $B_2/B_1$ ) が増加するほど減少する傾向が見られる。これは、乱れ速度が急縮部の直下流で急激に増大すると同様に平均速度も増大するが、その程度が縮小比の大きなものほど穏やかであるためと考えられる。

### 4.3 乱れ速度のスペクトル特性

以上のように、乱れエネルギーは流下方向に複雑な分布をなすことが明らかとなったが、さらに、乱れエネルギーの強度を周波数成分ごとに検討するため、乱れ速度のスペクトルの計算を行った。

水理条件は、速度場の3次元の特性についての条件と同じであり、データ処理は、サンプリング周波数  $f_s=20\text{Hz}$  および  $160\text{Hz}$  の2種を用い、データ数  $N=500$  個として行われている。

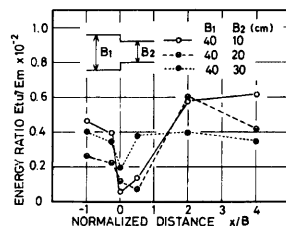


Fig. 11. Distribution of energy ratio  $E_{twr}/E_m$  around sudden contractions.

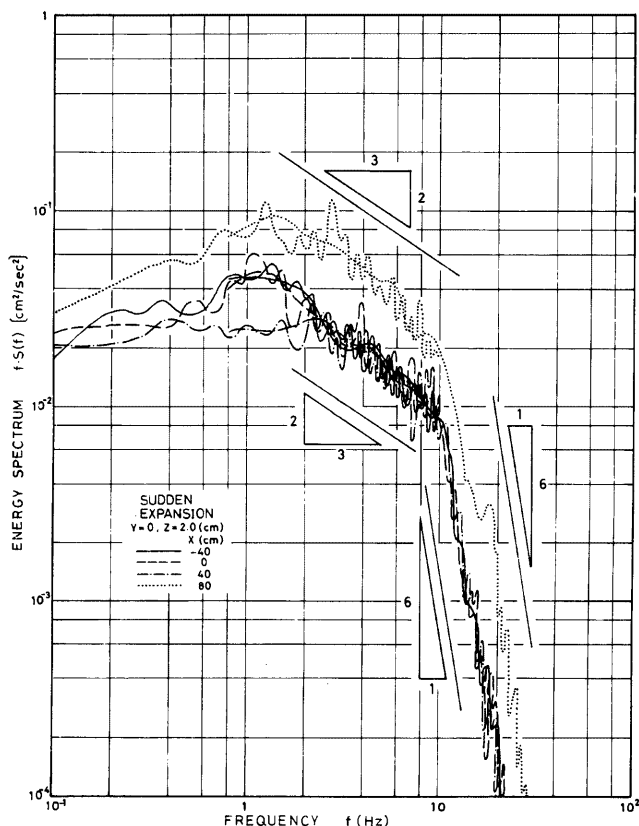


Fig. 12. Spectrum of turbulent energy of flow around sudden expansion.

**Fig. 12** および **Fig. 13** は、計算されたスペクトルの一例として、水路中心線に沿った半水深の位置でのスペクトルの流下方向の変化を示したものである。**Fig. 12** によると、急拡部の流れにおけるスペクトル密度は急拡部周辺で流下方向にあまり変化せず、 $x=80\text{cm}$  付近のかなり下流で増加することが知れる。

これに対し、**Fig. 13** に見られるような急縮部の流れにおいては、急縮部への接近とともに低周波数領域のスペクトル密度は減少し、急縮部付近で最小となったのちしだいに増加するが、中間周波数以上の領域では、流下とともにスペクトル密度が増大する傾向が見られる。

また、急拡部、急縮部のいずれの断面においても、低周波数領域で  $f \cdot S(f)$  は  $f$  の増加とともに増大するが、その後  $-2/3$  の勾配で減少する領域が現われ、さらに高周波数の領域では  $-2$  あるいは  $-6$  の勾配で減少する傾向が認められる。

図の縦軸を  $f \cdot S(f)$  から  $S(f)$  に変えられれば、これは中間周波数領域より高い周波数領域で  $S(f)$  が  $f$  の増加とともに勾配が  $-5/3$  から  $-3$  あるいは  $-7$  で減少することを示している。このような慣性領域ある

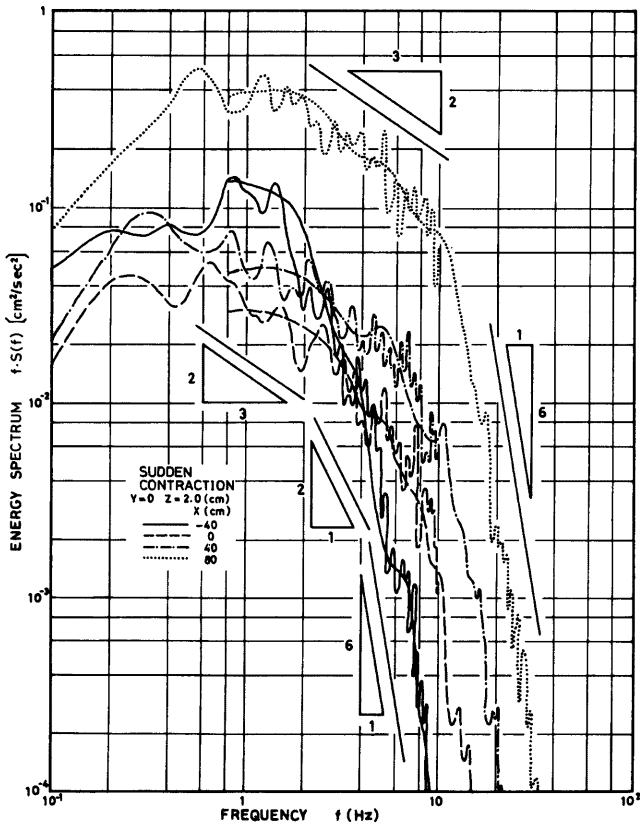


Fig. 13. Spectrum of turbulent energy of flow around sudden contraction.

いは粘性領域とみなし得る周波数領域が存在することにより、高周波数の乱れについては Kolmogorov<sup>15)~17)</sup>の相似則の成立性が認められ、この領域の乱れについては局所的等方性として取扱えることが知れる。ただし、中間周波数として取扱える周波数は、各ケース断面位置ごとに異なっており、この点についてはさらに検討が加えられる必要がある。

#### 4.4 レイノルズ応力分布

**Fig. 14** は、急拡部についてレイノルズ応力  $-\overline{uv}$  および  $-\overline{uv} = \epsilon_y (\partial U / \partial y)$  で定義される渦動粘性係数  $\epsilon_y$  の横断分布を水路右岸側半幅について示したものである。図より、 $-\overline{uv}$  は平均速度分布に伴い複雑な分布形となり、計算された  $\epsilon_y$  の値はいずれの断面においても水路中央部ほど大きくなる傾向が見られる。

**Fig. 15** は、水路中央部におけるレイノルズ応力  $-\overline{uw}$  および渦動粘性係数  $\epsilon_z$  の鉛直分布を示したものの

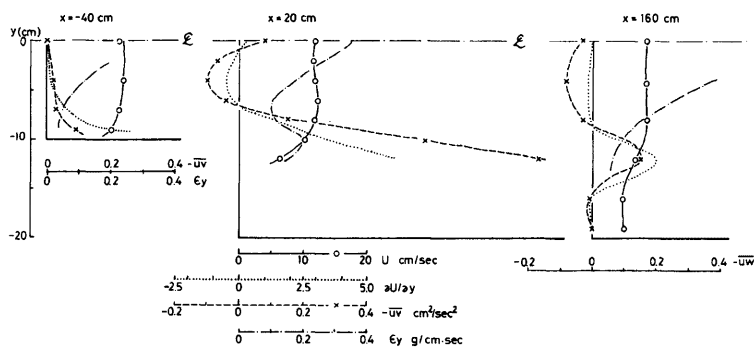


Fig. 14. Lateral distribution of Reynolds stress  $-\overline{uv}$  of flow around sudden expansion.

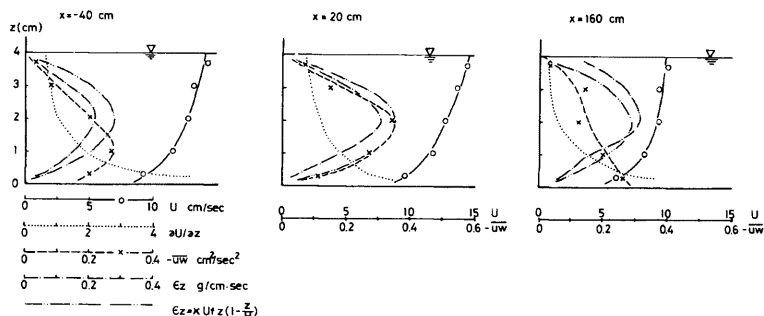
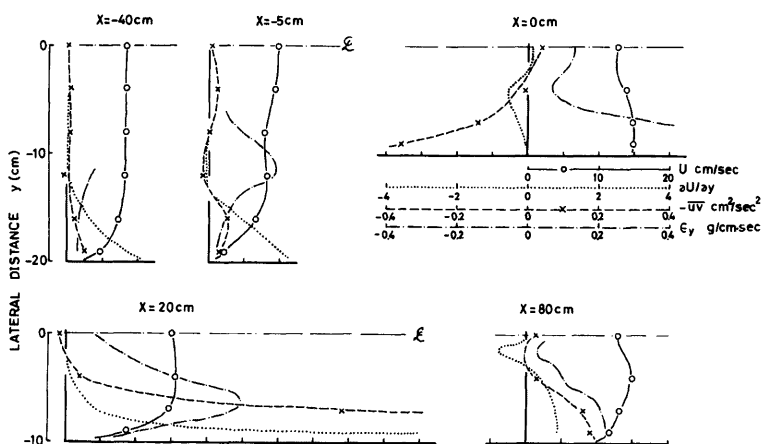
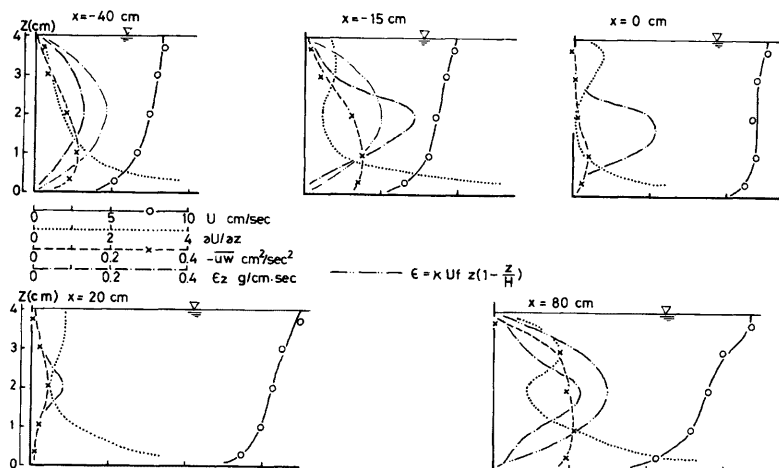


Fig. 15. Vertical distribution of Reynolds stress  $-\overline{uw}$  of flow around sudden expansion.

Fig. 16. Lateral distribution of Reynolds stress  $-\overline{uv}$  of flow around sudden contraction.Fig. 17. Vertical distribution of Reynolds stress  $-\overline{uv}$  of flow around sudden contraction.

であって、 $-\overline{uv}$  は表面付近でほぼ 0 となり、路床に向い単調増加することが知れる。また、 $\epsilon_y$  と同様に計算された  $\epsilon_z$  の値は、開水路 2 次元流れでの  $\epsilon_z = \kappa U_f z (1 - z/H)$  と定性的に比較的良好な一致をみせ、急拡部における流れでも水路中央部では 2 次元流れに近い状態であることが知れる。

同様の整理を急縮部について行なったものが Fig. 16 および Fig. 17 である。Fig. 16 によると、 $-\overline{uv}$  および  $\epsilon_y$  の横断分布形は非常に複雑であり、とくに、 $x=0\text{cm}$  の断面では平均速度が側壁付近ほど

大きいため、レイノルズ応力は側壁付近で負の値となり、その絶対値はいずれの断面においても大きいことが知れる。また、 $-\overline{uw}$  および平均速度勾配はともにその値が小さく分布形も複雑なため、両者から求められた渦動粘性係数  $\epsilon_s$  の値は信頼性に乏しく、その特性を一概に論ずることは困難である。

また、レイノルズ応力の鉛直分布を示した Fig. 17 によれば、 $-\overline{uw}$  の値は急拡部と同様水面付近でほぼ 0 となり、路床に向い増加する傾向が見られる。これに対し、平均速度勾配は急拡部のように単調な分布形には必ずしもならないが、両者から求められた  $\epsilon_s$  は急拡部と同様半水深付近で最大値をとることが知れる。

## 5. 移動床における実験的検討

### 5.1 実験装置および方法

本実験に用いられた水路は、長さ 14m、幅 50cm、高さ 20cm の鋼鉄製長方形断面一様水路であるが、2.1 の方法と同様に、木製合板を用いて、急拡部あるいは急縮部として使用されている。勾配は 1/500 に設定されており、流量は三角ぜき、あるいは、流量ますにより計測されている。河床砂は、一定厚さになるよう注意深く敷かれている。

実験中は、適当な量の給砂を行うことが望ましいが、本実験では、流砂量がさほど多くないこと、および上流区間が長くとられていることから、給砂は行われていない。なお、実験に使用された砂は、Fig. 18 に示される粒度分布を持ち、その平均粒径は  $d_m=0.85\text{mm}$  である。

### 5.2 急拡部における河床変動特性

本実験は、拡大比 50/25 の急拡部を対象とし、流量  $Q=5.4\text{l/sec}$ 、勾配  $I=1/500$  のもとで行われた。

Fig. 19 は、水位の時間変動を示したものであるが、通水

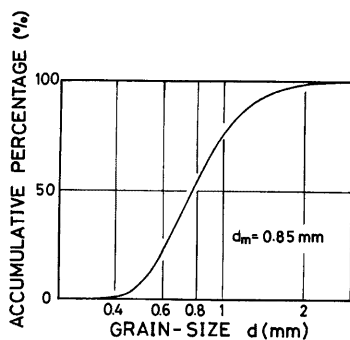


Fig. 18. Grain accumulation curve of experimental sand.

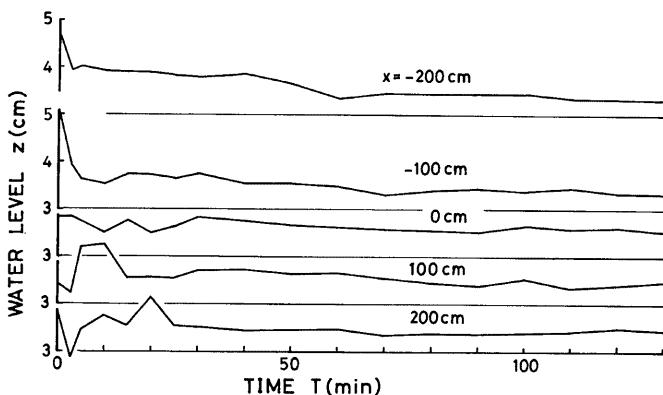


Fig. 19. Change of water level with time around sudden expansion.

後約1時間で水位がほぼ変動しなくなることが知れる。なお、急拡大下流側で通水後水位が一旦増加する傾向が見られるが、これは、上流からの掃流砂の一時的な堆積の影響によるものである。

本実験では、約2時間通水されており、十分平衡状態に達したものと考えられる。

**Fig. 20** は、水路中心線に沿った河床および水面形を示したものである。図より、急拡大上流側では河床低下が著しく、下流側では、流下に伴い河床が徐々に上昇することが知れる。また、水位は、上流側ではかなり低下するのに対し、下流側ではほとんど変化がない。その結果、急拡大下流側水深は、上流側水深のほぼ1/2倍となり、急拡大の上・下流側で流積が一定となるように河床が進行するという従来の研究結果<sup>10)</sup>を確かめることができる。

**Fig. 21** は、河床横断形状の流下方向の変化状況を示したものである。図によれば、急拡大上流側では、河床はほぼ平坦であって顕著な2次流の効果は現われていない。一方、下流側では、主流域で洗掘され剥離域内で堆積している。とくに、剥離境界面付近では、主流域に比し速度が急激に減少するため、著しい堆積作用により高い峰 (Sand ridge) が形成される。この峰は、 $x=5\text{cm}$  付近から現われ、 $x=30\text{cm}$  付近でもっとも高くなっている。

$x=5\text{cm}$  から  $100\text{cm}$  にかけて横断形状を比較すると、主流域において、Sand ridge 内面の傾斜が流下とともにゆるやかになり、さらにその幅も拡大しつつ河床が平坦となっていく様子がうかがわれる。 $x=150\text{cm}$  の断面では、もはや Sand ridge はなく、逆に水路中央部が高くなっており、さらに下流で、河床は徐々に平坦となっていく。

このような急拡大部周辺の河床の変動状況は、**Fig. 22** に示された等高線によってもよく現わされており、2.2.3 で明らかとなった急拡大下流側での流れの拡大を、河床の変動特性においても見ることができる。なお、本実験においては、流れは水路中心線に対しほぼ対称となっており、偏流効果は現われていない。

### 5.3 急縮部における河床変動特性

本実験は、縮小比25/50の急縮部を対象とし、流量  $Q=2.1\text{ l/sec}$ 、勾配  $I=1/500$  のもとで行われた。

急縮部では、流線方向が徐々に拡大していくのに対し、急縮部では流線方向が急激に変化するため、流れが急縮部周辺の境界面付近に及ぼす流体力は急縮部の場合よりかなり大きい。したがって、急縮部周辺では、急縮部の場合よりかなり著しく洗掘される。また、通水直後の洗掘量も急縮部の場合より多く、通水後短時間でほぼ洗掘が完了し、それに伴い水面形も短時間で急激に変化する。その後ゆるやかに洗掘が進行し、水位変動もほとんど見られない。

**Fig. 23** は、河床の変動状況を示したものであって、初期の水面形は変動が急激で計測が困難なため示されていない。図によれば、急縮部上流側ではせき上げ効果のため速度が小さく、河床はほとんど変動していない。また、急縮部直下流においては、水深が上流側の約2倍程度になっており、急縮部においても、流積

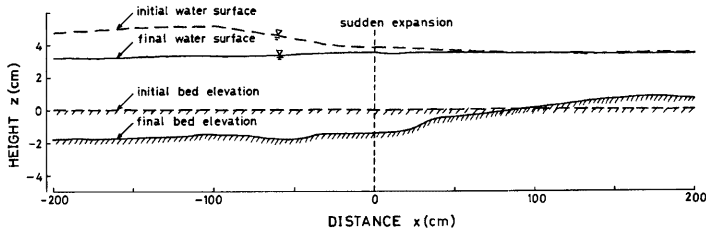


Fig. 20. Water surface profile and bed elevation around sudden expansion.

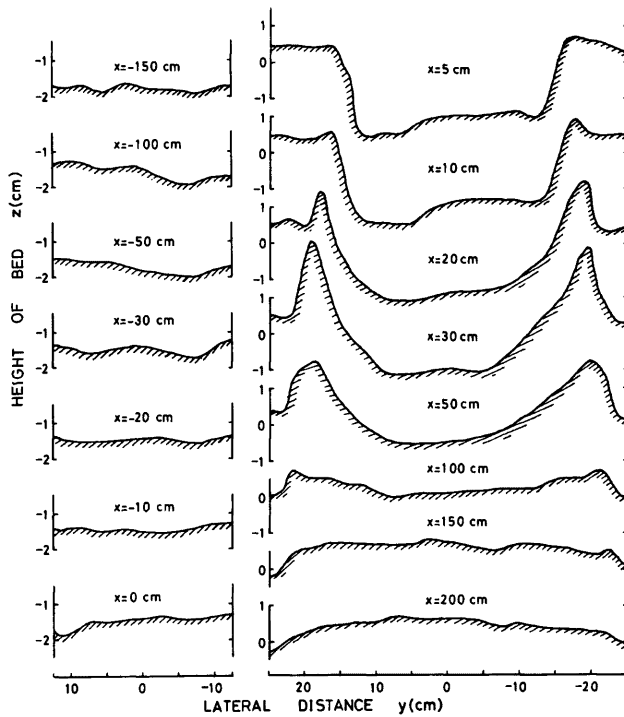


Fig. 21. Lateral bed profile around sudden expansion.

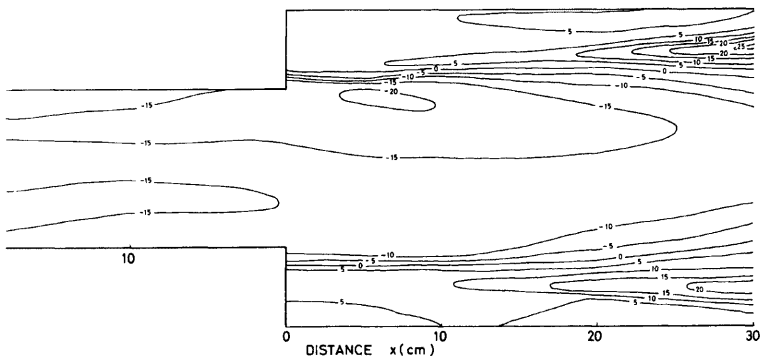


Fig. 22. Contour line of bed elevation around sudden expansion.

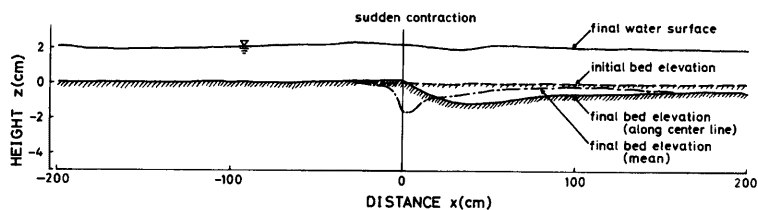


Fig. 23. Water surface profile and bed elevation around sudden contraction.

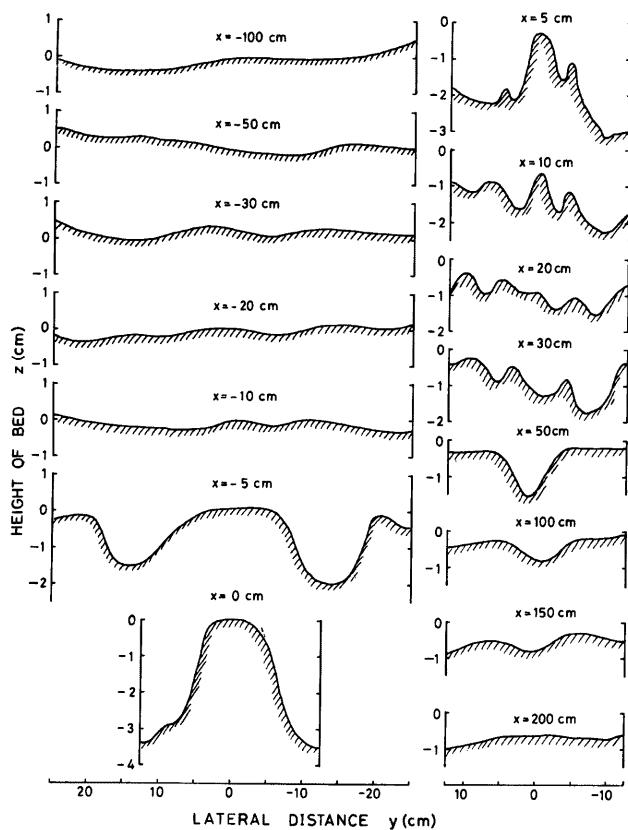


Fig. 24. Lateral bed profile around sudden contraction.

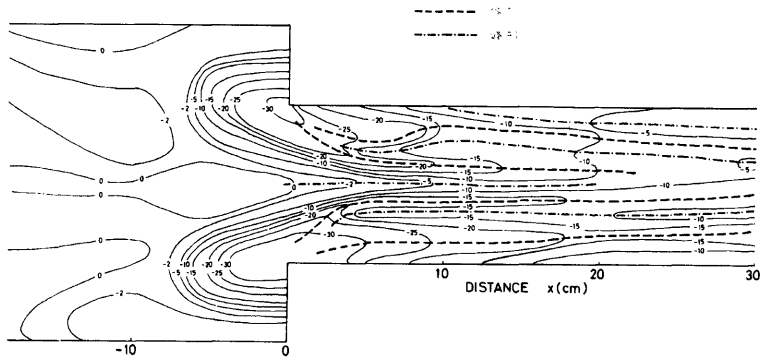


Fig. 25. Contour line of bed elevation around sudden contraction.

を一定に保つべく河床が変動する事実が確かめられる。なお、水面形については、水路幅の急縮にもかかわらず急縮部を通じて水位がほぼ一定となる傾向が見られる。

さて、実験中における砂粒の運動の観察より、流れの挙動をある程度把握することができるが、それによれば、急縮部周辺の流れの挙動はかなり複雑であって、河床もそれに伴い複雑に変動する。そこで、実験中観察された流れの挙動を考慮しつつ、平衡状態での河床の横断形状を示した Fig. 24 およびこれを等高線で示した Fig. 25 の両図より検討を行うと次のようである。すなわち、急縮部周辺における速度の大きい流れのために、急縮部のエッジ付近が著しく洗掘され、急縮部直下流では、両側壁から水路中央に向う流れのために両側壁付近で洗掘が生じ、まき上げられた砂粒の一部は水路中央に向う斜面を上昇できずに斜面途中で堆積し、側壁に沿った峰を形成するようになる。このように急縮部直下流における河床の横断形状は、Fig. 24 にも示されるように、複雑な形状となるが、この状態は、中央に向う流れが再び側壁に向け分離しはじめる  $x=20\sim30\text{cm}$  付近まで続いており、さらに下流で平坦な河床へと回復していく様子が認められる。

以上のような流れの挙動および河床の変動特性より、とくに、急縮部下流側の顕著なせん流の存在が推察されるが、このような特性は、2.2.3 での平均速度の3次元の特性とも一致するものと考えられる。

## 6. 結 論

本報告は、水路幅が急激に変化する急拡部あるいは急縮部を対象として、ホットフィルム流速計を用いた速度計測により、乱流構造をも含めた内部構造に関して実験的検討を行うとともに、移動床における実験的検討を加えたものである。

本研究により明らかとなった事実を列挙すると次のとおりである。

1) エネルギーおよび運動量補正係数は、急拡部の場合と急縮部の場合とでは、その分布特性はかなり異なる。すなわち、急拡部の場合には上流側でほぼ1に近い値となるが下流側で増大する。この傾向は常流遷移でかつ拡大比の大きい場合ほど著しい。これに対し、急縮部の場合には、いずれの遷移状態においても下流側のみならず、上流側においてもその値が増加するが、最大値はさほど大きくはならない。

2) 乱れ速度成分のうち、 $u'$  がもっとも卓越しており、乱れ速度成分のもつ乱れエネルギー分布を  $u'$  のみで検討することが可能である。

3) 水路幅変化比を変化させ、 $u'$  のみにより乱れエネルギー分布を検討した結果、急拡部と急縮部とは、その分布特性がかなり異なることが明らかとなった。すなわち、平均流のもつエネルギーに対する乱れエネルギーの割合  $E_{tu}/E_m$  は、急拡部常流遷移の場合、下流側で増大するが、拡大比の増加とともにその傾向も強くなる。一方、急縮部常流遷移の場合には、下流側のみならず、上流側においても増大するが、その分布形は縮小比の変化の影響をあまり受けない。

4) 水路幅変化部における流れでも、中間周波数以上の周波数領域においては、慣性領域あるいは粘性領域とみなし得る領域が存在し、このような周波数領域に属する乱れは局所的等方性乱れとしての取扱いが可能である。

5) レイノルズ応力および平均速度分布より求められた渦動粘性係数は、本研究で対象とした急拡部下流側断面内では水路中央部ほど大きくなる傾向が見られる。一方、急縮部ではレイノルズ応力分布は非常に複雑で、急縮部における速度ベクトルの空間的変化の激しさがうかがわれる。

6) 平均速度場の3次元の特性および河床の変動特性より、急拡部下流側の拡大する流れおよび急縮部における集中する流れを認めることができる。また、急縮部下流側における顕著ならせん流の存在を類推することができる。

以上のように、水路幅変化部における流れに関し、種々の実験的検討を行った結果、いくつかの興味ある結果が得られたが、今後、さらにこれらの特性について定量的検討を加えるとともに、剥離域内の内部構造、圧力分布特性、漸変流との比較などといった事項について検討を加えることにより、断面変化部における流れの水理特性の解明がより一層進歩するものと考えられる。

最後に、本研究を行うにあたり、熱心に実験および資料解析に御協力いただいた京都大学工学部学生西尾誠氏に深く謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 今本博健、藤井良啓：開水路断面変化部における流れの水理特性について (1)、京大防災研究所年報、第18号 B, 1975.
- 2) Rouse, H., Bhoote, B.V. and En-Yuu Hsu: Design of channel expansions, Trans., A.S.C.E., Vol. 116, 1951.
- 3) Ippen, A.T. and J.H. Dawson: Design of channel contraction, Trans., A.S.C.E., Vol. 116, 1951.
- 4) Formica, G.: Esperienze preliminari sulle perdite di carico nei canali dovute a cambiamenti di sezione, l'Energia Elettrica, Vol. 32, 1955.
- 5) 芦田和男、荒木民哉：開水路断面急拡部における水理に関する研究 (1)、建設省土木研究所報告, 101号, 1958.
- 6) 芦田和男：開水路断面急変部の水理とその適用に関する研究, 学位論文, 1961.
- 7) 芦田和男：開水路断面急変部の水理とその適用に関する研究, 京大防災研究所年報, 第5号 A, 1962.
- 8) 石原藤次郎、志方俊之：開水路急拡部の水理学的性状に関する研究, 土木学会論文集, 第128号, 1966.
- 9) 石原藤次郎、志方俊之：開水路急縮部の水理学的性状に関する研究, 土木学会論文集, 第138号, 1967.
- 10) 室田明、劉世甫：流積急変部での河床の局所変動について, 土木学会年講, 1962.
- 11) 杉尾捨三郎、湯浅博明：水路急縮部の洗堀現象について, 土木学会年講, 1962.
- 12) 芦田和男：断面変化部における河床変動に関する研究 (I), 京大防災研究所年報, 第6号, 1963.
- 13) 芦田和男、宮井宏：断面変化部における河床変動に関する研究 (II), 京大防災研究所年報, 第7号,

1964.

- 14) 道上正規：流砂と河床変動に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1972.
- 15) Kolmogorov, A.N.: The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, Comptes Rendus (Doklady) de l'Academie des Sciences de l'U.R.S.S., 30, 1941.
- 16) Kolmogorov, A.N.: On degeneration of isotropic turbulence, Comptes Rendes (Doklady) de l'Academie des Sciences de l'U.R.S.S., 31, 1941.
- 17) Kolmogorov, A.N.: Dissipation of energy in locally isotropic turbulence, Comptes Rendes (Doklady) de l'Academie des Sciences de l'U.R.S.S., 32, 1941.