

非定常流による蛇行水路の河床変動に関する実験的研究

澤井 健二

AN EXPERIMENTAL STUDY ON BED VARIATIONS DURING FLOOD IN A MEANDERING CHANNEL

By *Kenji SAWAI*

Synopsis

In this study, the characteristics of bed variation in meandering channels under unsteady flow conditions are discussed based on some experiments. In order to measure the bed profiles quickly along the lines parallel and normal to meandering bank lines, the carriage with an optical bed profiler was driven by two pulse motors which were controlled by a personal computer.

According to the obtained data, it seems that the bed profiles near bends are mainly controlled by its plane form and does not change so much throughout the experiment except for the initial stage. This result coincides with that obtained by some field observations.

1. ま え が き

最近、計測技術の進展に伴って、実河川における洪水時の河床変動データが徐々に蓄積されつつあるが、それとあいまって、実験室においても非定常な水理条件下における河床変動過程を詳細に計測し、種々のスケールにおける現象間の共通点と相違点を明らかにするとともに、その解析法を確立することは、河川工学上きわめて重要な課題である。

著者らは、数年来、移動床水理実験の自動計測制御化につとめているが¹⁾、本研究は、さらに非定常河床変動実験でネックとなっていた河床形状計測の効率化を図り、蛇行水路における流量変化に対する河床の応答を詳細に計測し、その特性を明らかにしようとしたものである。

2. 実 験 方 法

実験には、Fig. 1に示すような幅20 cm、深さ10 cm、波長2 mの蛇行低水路を有する幅1 m、長さ10 m、勾配1/100の複断面水路を用いた。河床には平均粒径1.3 mmのほぼ均一な砂を5 cmの厚さに敷き、インバータでポンプの回転数を制御することによって上流から定常または正弦波状流量を供給した。下流に流出した砂は漏斗状の金網に集めて、小型の水中ポンプで上流へフィードバックした。

実験条件はTable 1およびTable 2に示す通りで、Case-S1からCase-S4までは低水路内のみの流れ、Case-S5は高水敷へのオーバーフローが生じる流れである。一方、Case-U1からCase-U3は、正弦波状に流量が変化する場合で、Case-U1とCase-U2は低水路内で水位を上下させているのに対し、Case-U3では大流量時には高水敷へのオーバーフローが生じている。

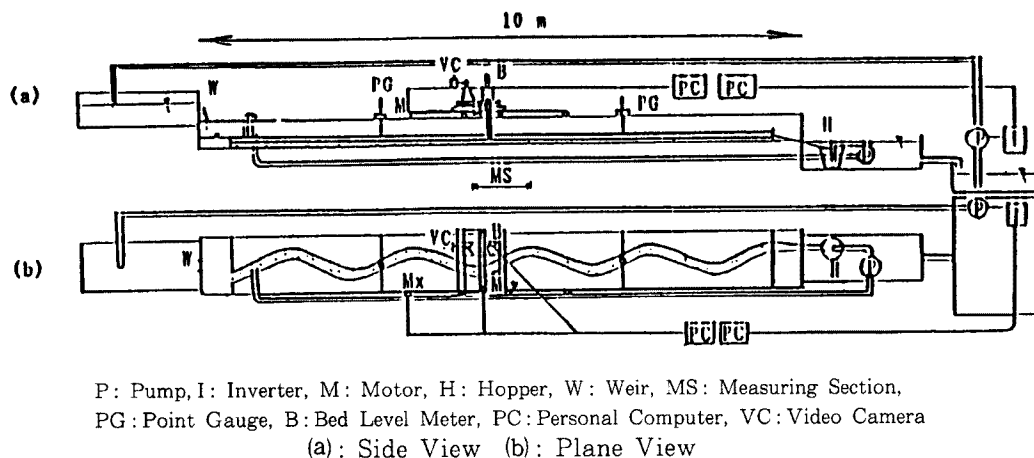


Fig. 1. Experimental equipments.

Table 1. Experimental conditions. (steady discharge cases)

Case-S1	Case-S2	Case-S3	Case-S4	Case-S5
$Q=0.96$ (1/s)	$Q=1.2$ (1/s)	$Q=2.0$ (1/s)	$Q=3.4$ (1/s)	$Q=7.3$ (1/s)

Table 2. Experimental conditions. (unsteady discharge cases)

Case-U1	Case-U2	Case-U3
$Q=0.6-3.4$ (1/s)	$Q=0.6-3.4$ (1/s)	$Q=0.6-7.3$ (1/s)
$T=90$ (min)	$T=30$ (min)	$T=30$ (min)

主な計測項目は流量、水位（水面勾配）、河床形状であるが、さらに半波長内での流砂量分布と水面流速分布をも計測するために、台車にビデオカメラを搭載した。

河床形状の計測には、種々の方法を試みたが、本実験のように水深が比較的小さく、しかも水のあるところとないところが混在し、さらに曲線に沿って計測する必要がある場合には、現在のところ、光反射式のサーボ河床計がもっとも使いやすく、パルスモータを組み合わせた自動XY台車に搭載して若干の手動操作を交えながら計測した。手動操作を交えたのは、水深が数mm以下のところで、センサーが空中に出てしまい、水面を計測してしまうからである。河床の計測線は、低水路法線に直角および平行で、半波長の間の7横断線と低水路両岸から1cm離れた2縦断線とした。これらの計測線に沿ってほぼ1cm間隔に計測点を定め、それらの座標をメモリーから呼び出してステップ数を算出しながら台車を移動させた結果、片道の計測に約2分間を要した。ただし、モーターの回転は直径約5cmのプーリーと2mmのワイヤで台車に伝達し、1パルス当りの移動距離は、X方向が0.126mm、Y方向が0.844mmである。また、モーターの制御パルスはBASIC言語によってパソコンのプリンタ端子から出力した。各計測点では、砂面計の出力電圧をパソコンによってAD変換して記憶させ、一連の計測が終わった後にディスクにセーブした。

水面流速の計測には、直径5mmのパンチ紙片を約1cm間隔に並べて低水路の所定の横断線上に落下させ、すばやくビデオ撮影して実験後にコマ送りしながら1/15秒間のトレーサーの移動を読み取った。用いたビデオ装置の解像度はあまり高くないため、視野は約20cm四方にし、前述のXY台車にカメラを搭載して、縦断的に移動させながら撮影した。

河床変動を支配する重要な要素である流砂量の空間分布の計測には、ビデオ撮影をさらにクローズアップして視野を5cm四方とした。これにより、個々の砂粒の運動が読み取れるようになったが、コマ送りに

すると、着目砂粒の識別が難しくなるので、ここでは通常再生状態で、ある長さの横断測線（ここでは4 cm）を単位時間（ここでは10秒間）に通過する粒子個数をカウントすることにより、その場所の縦断方向流砂量を求めるという方法をとった。流砂の横断成分は、各場所における粒子の平均的な運動方向を読み取って、縦断方向成分にその正接を乗じることにより求めた。ただし、水面に波立ちのある場合には、砂粒を読み取ることはできなかった。なお、ビデオ画像の読み取りには、スーパーインポーズボードとマウスを用いた著者の方法²⁾を用いた。

3. 実験結果

Fig. 2は、定常流の各実験ケースにおける初期河床を基準とした低水路内の河床等高線を示したもので、Fig. 3は、各実験ケースにおける最高河床位と最低河床位の時間変化を、水位の時間変化とともに示したものである。最も流量の小さなCase-S1では、通水開始後2時間までは、ほとんど粒子が移動せず、顕著な河床変動が生じなかったのに対し、2時間から2時間40分にかけて $\phi = 60^\circ$ 付近の外岸側で急速に洗掘が進行し、その後ほぼ定常状態を保っている。それよりも流量の大きなケースでは、通水開始直後から $\phi = 60^\circ$ 付近の外岸側で急速に洗掘が生じるとともに、内岸側に堆積が生じ、比較的短い時間で定常状態に達している。最大洗掘位置は、流量の増加とともにやや上流側に移動し、湾曲頂部に近くなっている。洗掘速度が流量の増加に伴って増加するのに対し、最大洗掘深は流量の増加に伴ってやや増加する傾向にあるものの、顕著な差異は現れなかった。もっとも、Case-S4とCase-S5では、深掘れ部で水路床が露出してしまったため、洗掘限界は把握できなかった。

Fig. 4は、正弦波状流量の各実験ケースにおける初期河床を基準とした低水路内の河床等高線を示したもので、Fig. 5は各実験ケースにおける最高河床位と最低河床位の時間変化を、水位の時間変化とともに示したものである。いずれのケースにおいても、断面変化は大局的には1周期目の間に完了し、2周期目以降では、流量が大幅に変化しているにもかかわらず、河床形状はさほど変化しないようである。

Case-U1とCase-U3では、流量変化の1周期目におけるデータが得られていないが、Case-U2のデータを見ると、1周期目の中でも特に通水開始直後の河床変動が顕著で、きわめて急速に洗掘と堆積が進行し、その後は流量変化に対応してわずかに洗掘と埋め戻しが繰り返されていることがわかる。

そこで、流量変化と河床高との対応に注目すると、多少の遅れはあるにしても、3つのケースに共通して、ほぼ大流量時に最大洗掘深が増加し、小流量時にそれが少し埋め戻されていることがわかる。Case-U1とCase-U2は、流量の変化周期によって河床高の変化量がどのように変わるかを見ようとしたものであるが、最大洗掘深の変化幅はどちらのケースも1 cm程度であり、顕著な差異は見いだせない。これは、流量変化に対する河床の応答が比較的速く、周期30分の流量変化に対してでも湾曲外岸での洗掘と埋め戻しが敏感に反応しているからであると考えられる。

一方、湾曲内岸部での堆積高の時間変化と流量変化の対応には、必ずしも一定の傾向が見られない。これは、堆積部では小流量時に浮洲が現れるなど、砂の移動しない時間がかなり存在することや、水深が小さいことによる河床計測の誤差にも起因しているものと思われる。

また、洗掘部、堆積部とも、時間の経過とともにその変動幅が小さくなる傾向が見られるが、これは流砂を循環させることにより、（波長規模で均した意味で）流れをできるだけ等流状態に近く保とうとしたにもかかわらず、上流部でより大きな洗掘、下流部でより大きな堆積が生じ、河床勾配が時間とともに減少していったためであると考えられる。

いずれにせよ、初期を除いて最大洗掘深や砂州高の変化幅がさほど大きくないことは注目される。

Fig. 6はCase-U1における表面流速の時間変化を示したものである。通水開始直後の $t = 4.8$ 分には低水路の法線にほぼ平行で比較的一様な流速分布が現れているが、 $t = 23 - 26$ 分には湾曲部外岸への流れ

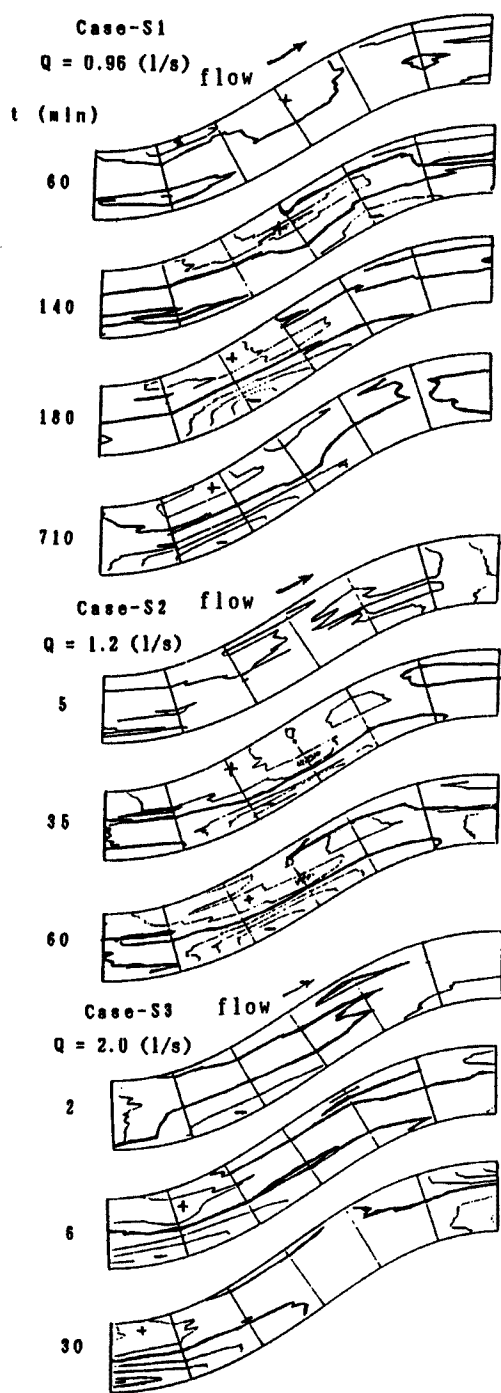


Fig. 2. Bed contour in steady discharge cases. (interval by 1cm, bold lines correspond to 0, dotted area means drained part)

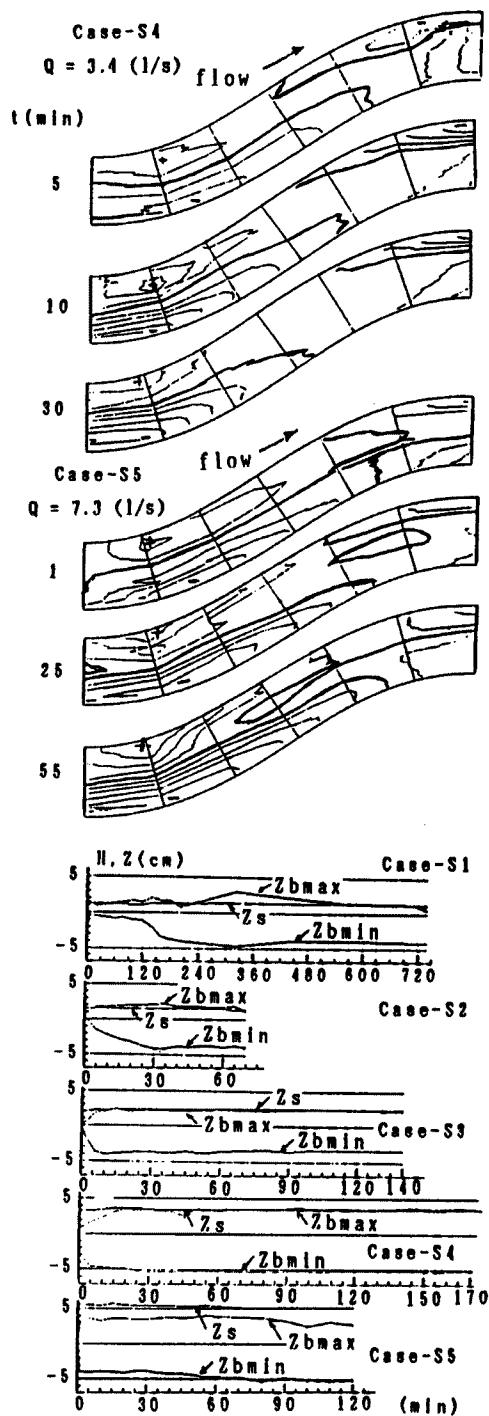


Fig. 3. Variation of water and bed level in steady discharge cases.

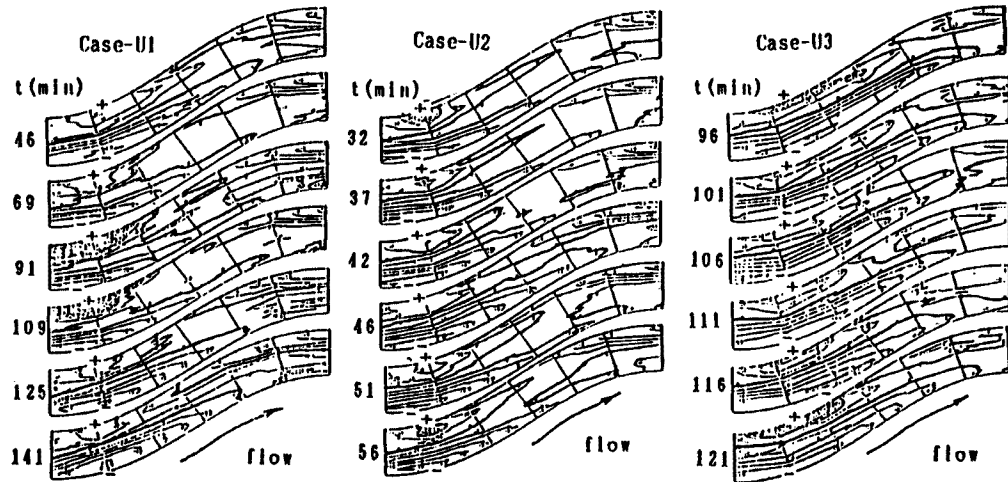


Fig. 4. Bed contour in unsteady discharge cases. (Interval by 1cm, bold lines correspond to 0, dotted area means drained part.)

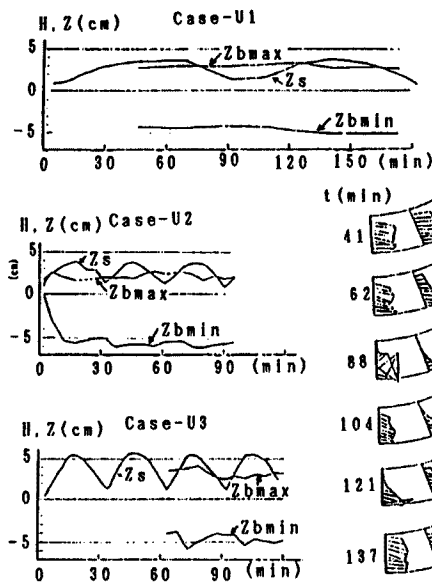


Fig. 5. Variation of water and bed level in unsteady discharge cases.

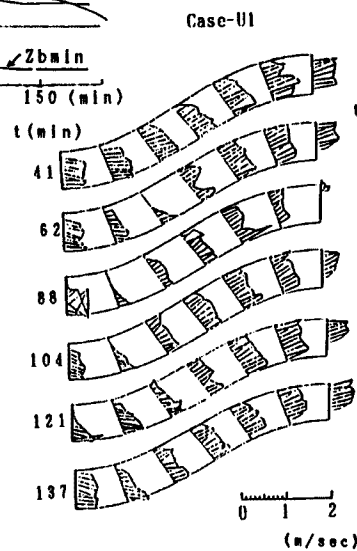


Fig. 6. Surface velocity distribution in Case-U1.

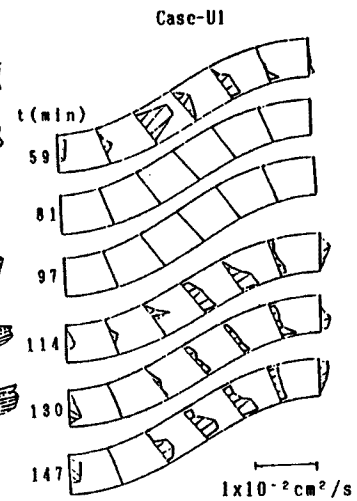


Fig. 7. Sediment discharge distribution in Case-U1.

の偏りが見られる。

Fig. 7 は、Case-U1 における流砂の向きと単位幅流砂量の分布を示したものであり、周期内でその分布が大きく変動していることがわかる。湾曲外岸が欠測になっているのは、水面における波立ちのためである。

Fig. 6 と Fig. 7 を対比すると、表面流速と流砂量はあまり対応していないが、これは 2 次流の影響の強いことを示唆している。

4. 他の研究(実験, 観測, 数値解析)との比較

芦田³⁾は先にこの実験水路を用いて定常流による河床変動実験を行っている。それによれば、流量が0.87, 2.15, 7.15 l/s, したがって水深が1.5, 2.6, 4 cmと異なっても、平衡状態における最大洗掘深はあまり変わらず、3.5-4 cmになっている。このうち、前2者は、低水路内のみを流れる単断面流れ、後者は高水敷にも流れる複断面流れの場合である。ただし、最大洗掘深の生じる位置は単断面の時には $\phi = 30^\circ$ 付近であるのに対して、複断面の時には $\phi = 90^\circ$ 付近になっている。今回の著者の実験では、最大洗掘深が約5 cmとなっているが、計測区間の平均河床そのものが約1 cm低下していることを考え合わせると、流れが非定常であっても最大洗掘深に大きな差は生じなかったことになる。

一方、最大堆積厚は、芦田らの実験では、単断面のケースで、1.2 cmおよび2 cm、複断面のケースで1.5 cmで、その位置は、単断面のケースで $\phi = 30^\circ$ 、複断面のケースで $\phi = 60^\circ$ となっている。これに対して今回の実験では、Case-U1で3 cm、Case-U2で2.5 cm、Case-U3で3 cmの堆積が生じており、芦田らの定常流での実験結果と際違った違いを見せている。

また、これと類似の水路を用いた芦田・江頭・足立⁴⁾の実験と比較しても、同様のことがらが見いだされた。

さらに足立⁵⁾はその水路において、流量0.62 l/sで形成された河床の上に流量0.92 l/sを供給した時の河床変動を計測している。それによると、流量増加の直後に最大洗掘箇所が一時的に下流方向に移動するが、やがて元の位置に復している。

最近、木下⁶⁾によって尻別川下流部の御成橋付近における融雪出水に際する現地観測が行われ、水衝部前面の最深部河床高は洪水中ほとんど変化せず、砂堆による凹凸は高位面において盛んであることが見いだされている。

一方、昭和56年の石狩川における洪水前後の調査では、断面によってきわめて大きな河床変動の生じたことが報告されている⁷⁾。

著者は以前に主として砂堆を対象として、流量変化時の河床波の応答特性について検討したが、それによると、条件によっては洪水中に大きな河床変動の生じる場合のあることが見いだされている⁸⁾。

このように、一口に洪水時の河床変動といっても、条件によってその特性が異なり、限られた条件下での実験や観測結果から普遍的な結論を導くことは困難である。

最近、2次元河床変動解析が急速に進展し、解析精度が向上しているが、多くの場合、定常流を対象とした解析にとどまっている。今後、これを非定常条件下に適用することによって、広範な検討のなされることが期待される。

5. 結 語

以上、非定常流による蛇行水路の河床変動について、詳細な実験を行い、定常実験の結果と比較するとともに、他の研究結果との比較を行った。得られた結果を要約して結語とする。

(1) 曲線に沿う計測台車の駆動制御を行うことにより、従来なし得なかった迅速な河床計測が可能となり、流量が正弦波状に変化する場での蛇行水路の河床変動を詳細に計測することができた。

(2) 本実験の範囲内では、最大洗掘深やその発生位置は主として流路の平面形状によって支配され、流量が変化してもさほど変化しなかった。

(3) その傾向は実河川の洪水観測でも見いだされているが、実験や観測ケースが限られており、普遍的なものと判断するのは早計である。

(4) 今後、実験や観測事例を増すとともに、数値解析を併用して一般化を図ることが有用であろう。

本研究は、平成2・3年度校費特定研究「移動床水理現象の自動計測制御並びにデータ処理に関する研究」（研究代表者 京都大学防災研究所今本博健教授）および平成2・3年度文部省科学研究費補助金総合研究（A）「種々のスケールにおける流れと流砂の同時計測による土砂輸送・河床変動機構の解明」（研究代表者 京都大学防災研究所芦田和男教授）の補助を受けて行ったものである。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 藤田裕一郎・澤井健二：移動床水理実験におけるラボラトリーオートメーションに関する研究，水工学論文集，Vol. 34，1990，pp. 701-706.
- 2) 澤井健二：スーパーインポーズボードとマウスを用いたパソコンによるビデオ画像読み取り法，自然災害科学，Vol. 7，No. 1，1988，pp. 49-57.
- 3) 芦田和男・江頭進治・劉炳義・滝口將志：蛇行水路を有する複断面水路における流れの特性と河床変動特性，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，1989，pp. 527-551.
- 4) 芦田和男・江頭進治・足立幸郎：蛇行水路における河床変動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第31号B-2，1988，pp. 443-459.
- 5) 足立幸郎：蛇行水路の流れと河床変動に関する研究，京都大学修士論文，1988.
- 6) 木下良作：砂洲・砂堆など河床波の洪水時形態変動，土木学会水理委員会基礎水理部会・科学研究費総合研究班共催ミニシンポジウム「流れと流砂の同時計測」，1991.
- 7) 岸 力・板倉忠興・藤田睦博・長谷川和義・森明巨・黒木幹男・久米洋三・牧野成雄：洪水流と河道の機能の研究，昭和56年度科学研究費補助金（自然災害特別研究(1)）研究成果報告書「昭和56年8月北海道豪雨災害に関する調査研究」，1982.
- 8) Sawai, K.: Transformation of Sand Waves Due to the Time Change of Flow Conditions, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 5, No. 2, 1988, pp. 1-14.