

複断面水路を通過する洪水波の水理特性

Hydraulic Characteristics of Flood Waves Passing Compound Channels

富永晃宏*、長尾正志**、三尾憲史***、劉 建***

By Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO, Norifumi MIO and Jian LIU

Hydraulic characteristics of unsteady flows were investigated experimentally when flood waves were passing through compound open channels. Some noticeable features of unsteady flow structure in compound channels were revealed which were significantly different from those in single rectangular channels. The unsteadiness of velocity becomes very large in main channels and the peak of velocity appears very earlier than in rectangular channels. Lateral shear stress increases in a rising stage at an interface region of main channel and flood plain. The bed shear stress exceeds the value of steady peak flow in the rising stage.

Keywords: flood wave, compound channel, unsteady flow

1. まえがき

河川の洪水流の流れ構造の解明は、河道の安定化や治水計画の策定のために重要な課題であるが、従来は洪水ピーク流量に相当する流量の定常流における実験、解析が主であった。また、治水施設は水位調節や河岸、河床の保護機能を果たすだけでなく、環境保全や親水性の考慮が必要とされ、これらが洪水時に水位の上昇や新たな河道災害の発生などの悪影響を及ぼさないかという検討が加えられなければならない。著者はこれまでに3次元乱流構造を研究し、断面内に生ずる2次流の特性とその役割について重点的に検討し、護岸の特性に関わる側壁の傾斜や粗度の効果を示し、複断面水路の高水敷肩近傍の流況を明らかにした¹⁾。一方、単純な長方形断面における不定流の流れ構造の研究がいくつか行われ、増水期・減水期の異なる乱流構造が明らかにされつつある^{2), 3), 4), 5)}。河道災害を引き起こす土砂の洗掘や堆積は構造物周辺で活発であり、ここでの不定流の断面の局所的領域に対する応答特性が最も重要な鍵を握っていると考えられる。現地観測においては石狩川における洪水時の河床変動計測⁶⁾や酒沼川における植生が繁茂した複断面河川の洪水流観測⁷⁾等により貴重な知見が得られている。このような局所的な流れが卓越する場における不定流の効果は今後検討すべき重要な課題であると考えられ、実験室における基礎的研究もさらに必要とされる。そこで、本研究ではまず複断面水路を洪水波が通過するときの流れの特性について実験的に検討したものである。洪水の増水期と減水期とは流れの特性が著しく異なるといわれるが、複断面水路では水深の明らかに異なる区

* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科
(〒152 名古屋市昭和区御器所町)

** 正会員 工博 名古屋工業大学教授

*** 学生会員 名古屋工業大学大学院

表-1 実験条件表

CASE	Q ₀ (l/s)	Q _p (l/s)	h ₀ (cm)	h _p (cm)	Th _p (sec)	λ	UmMAX(cm/s)
D60	5	20	3.94	8.22	72	0.72	68.27
D120			3.93	8.47	132	0.38	60.58
D240			4.10	8.72	256	0.19	54.07
T60			2.24	5.53	68	0.75	76.52
T120			2.26	5.75	132	0.38	75.10
T240			2.29	5.87	256	0.20	75.19

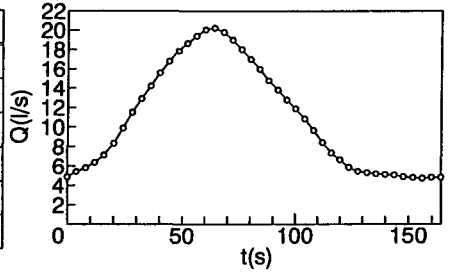


図-1 設定流量ハイドログラフ

間を洪水波がどのように伝播するのかを、特に流速の時間変化過程及び空間分布構造とせん断応力の時間変化過程に着目して検討した。

2. 実験方法

実験は幅60cm、長さ12mの勾配可変型開水路で行った。片側に上面幅26.2cm、下面幅30.4cm、高さ4.2cmで側壁傾斜 1:2の台形の高水敷を設置した。流量はインバータモーターと電磁流速計を組み合わせた流量制御システムを用い、コンピュータで任意のハイドログラフを与えることができる。水路勾配は $S=0.001$ とし、基底

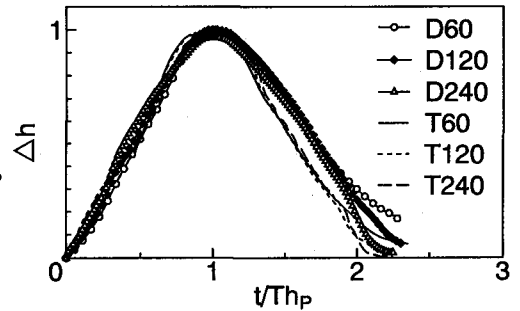


図-2 各条件における水深の時間変化

流量を $Q_0=5 \text{ l/s}$ とした。このとき、水深は 3.9cm となり流れは低水路内に限定される。ピーク流量 $Q_p=20 \text{ l/s}$ までをピーク到達時間 $T_p=60\text{s}, 120\text{s}$ および 240s で増加させ、10秒間ピーク流量を保持した後、同じ時間で基底流量まで減少させた。表-1に複断面水路(Dシリーズ)と比較のために行われた単断面水路(Tシリーズ)の水理条件を示す。表中の λ は高橋の非正常性パラメータで $\lambda=(h_p-h_0)/T_p/S\sqrt{gh_p}$ である⁹⁾。このような実験の場合実際の洪水との相似性が問題となるが、例えば実験の縮尺を水深方向に1/100、水平方向に1/200と考えると開水路非正常流の運動方程式に関する相似則から、時間スケールは $T_p=60\text{s}, 120\text{s}$ 及び $T_p=240\text{s}$ でそれぞれ20分、40分及び80分となる。このときピーク流量は $4000\text{m}^3/\text{s}$ になり、かなり急激な洪水に相当するが、 $T_p=240\text{s}$ ではオーダー的には比較可能なケースといえる。 $T_p=60\text{s}$ のケースの流量ハイドログラフを図-1に示す。複断面及び単断面の60s、120s、240sの各ケースの上流端から8.5m下流の計測地点における水深の時間変化を図-2に示す。時間は水深立ち上がり点を0とし、水深のピーク到達時間 Th_p で無次元化しており、縦軸は無次元水深増加量 $\Delta h=(h-h_0)/(h_p-h_0)$ である。表-1に示すように水深のピーク到達時間は、複断面と単断面でほとんど差がなかった。増水過程はいずれのケースもほぼ相似で直線的な増加を示すが、減水期では単断面では増水期とほぼ対称に減少するのに対して、複断面では減水が遅れていることがわかる。

流速は径 3mmの超小型プロベラ流速計を用いて計測し、同時に水深を容量式波高計を用いて計測した。洪水波の実験では流速計先端が水面に出たり入ったりするため、プロベラ流速計が計測に適している。ただし、水面近傍で流速と出力電圧との線形関係がくずれるため、予備実験によって水面からの距離で補正関係式を作り、流速計の直後におかれた波高計から得られる水深に基づいて流速に変換することとした。データは $T_p=60\text{s}$ と 120s では50Hzでそれぞれ180秒と320秒計測し、 $T_p=240\text{s}$ では20Hzで600秒計測した。洪水の各時間帯における流速分布を求めるために、流速計をトラバースさせながら同一の流量波形を繰り返し与えた。単断面では水路中央断面のみを計測し、複断面では横断面内の流れ構造の時間変化がとらえられるように計測を行った。主流速は水深の立ち上がり点より前4秒間の区間平均値を定常時の値とし、その点から4秒間ごとの

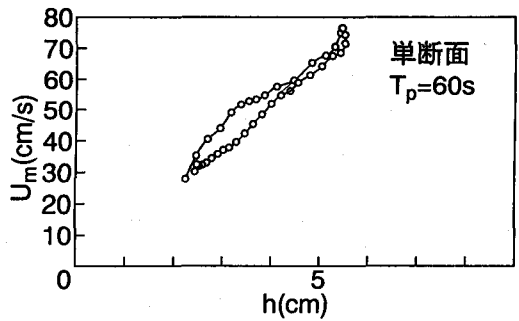
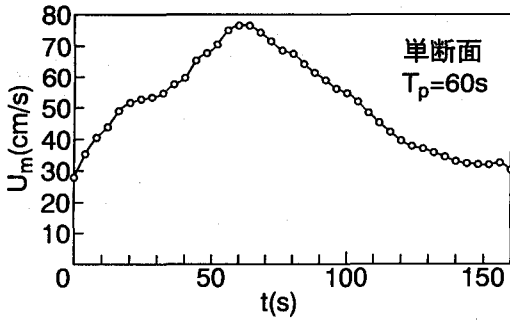


図-3 単断面における流速の時間変化および水深との関係

区間平均値の時間的変化について検討した。

3. 水深平均流速の時間変化特性

図-3は単断面の $T_p=60s$ の時の水路中央における水深平均流速 U_m の時間変化及び U_m と水深 h の関係を示したものである。 U_m のピークに達する時間は60sで水深ピーク時間より10s程度速い。増水期にいったん増加率が減少する部分が見られる。下流端は段落ちで低下背水となっているが、やはり下流端からの反射波による水面勾配の減少が原因かと思われる。水深-平均流速曲線から増水初期と減水後期では明確なループを描いているのが認められるが、ピーク前後では増水期・減水期で差がそれほど明確でない。一方、複断面の低水路、境界部および高水敷代表位置における水深平均流速 U_m の時間変化を図-4に示す。単断面では60秒付近でピークとなったのに対し、低水路の流速は約40秒付近で最大となり、ピーク到達時間が非常に速くなることがわかる。また、減水期においては、水深は流量が減少しても高い水深を維持しているため、流速はピーク後しばらくしてから定常時の流速よりも小さくなっている。境界部及び高水敷上の流速のピークは水深のピークの少し前の60秒付近に現れほぼ単断面のピーク時間と一致し、低水路のピークよりも遅れて現れることがわかる。これは $T_p=120s$ の場合もほとんど同様であるが、低水路の流速のピークは相対的にさらに早く現れるようになり、その後はゆっくりとした減少を示す。この傾向は $T_p=240s$ でも認められ、非正常性が極端に大きい時だけの特性ではないといえる。図-5は複断面の水深-平均流速曲線であり、低水路と高水敷における変化を示している。低水路においては $T_p=60s$ のとき非常に大きなループを描き、単断面に比べて非正常性が著しく大きくなるのがわかる。 T_p が大きくなるにつれ

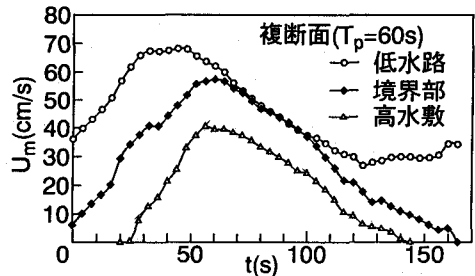


図-4 複断面における流速の時間変化

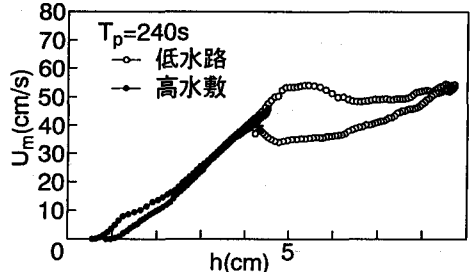
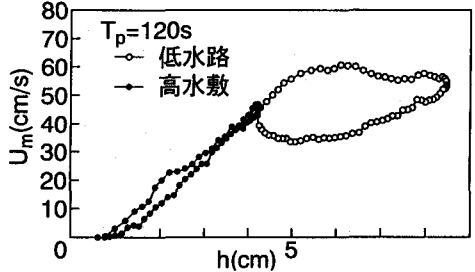
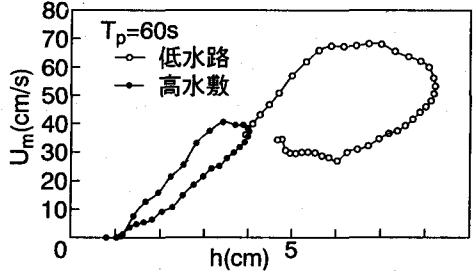
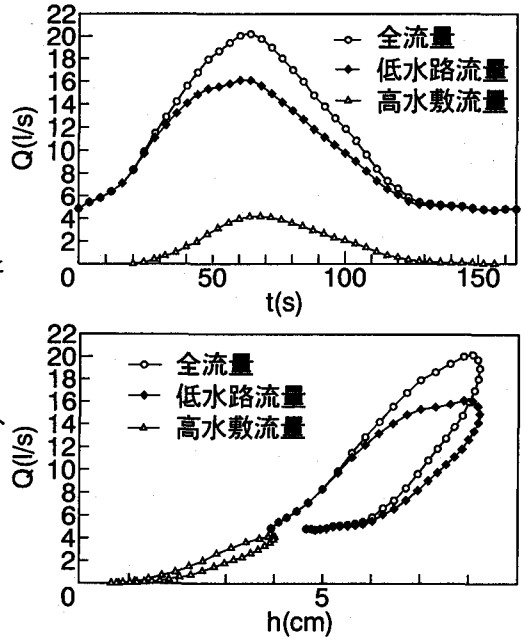


図-5 複断面における水深-流速曲線

ループは小さくなり、また流速の変化が小さくなるため寝てくるが、依然として非定常性が強いことを物語っている。高水敷上では、 $T_p=60s$ ではループを描いているが低水路に比べて非定常性は小さい。 T_p が大きくなるにつれてループは小さくなり増水期・減水期での差は小さくなっていく。図-6は各地点の平均流速を積分して得られた計測位置における流量ヒドログラフと水深-流量曲線である。全流量のピークは約64sに現れ水深ピーク時の少し前となり、低水路流速のピーク時よりはだいぶ遅れる。低水路流量のピークはこれよりわずか前、高水敷流量のピークはわずか後になるようである。低水路の流量配分が大部分を占めるため、低水路における強い非定常性の影響が全流量の非定常性となって現れている。低水路の水位-流量曲線が大きなループを描くことは酒沼川の観測においても認められている⁷⁾。



4. 複断面水路の3次元流れ構造の時間変化特性

図-7は $T_p=60s$ の増水期から減水期に至る間の低水路高水敷境界付近の主流速コンターを示したものである。また、ピーク流量に当たる $Q=2000cm^3/s$ の定常流のコンターも示している。増水期の $t=40s$ のコンターをみると低水路の流速が定常時よりもかなり大きくなり、高水敷に向かって急激に減少し、境界面で非常に大きな流速勾配が生じているのがわかる。ピーク時の $t=80s$

図-6 計測位置での流量ヒドログラフと水深-流量曲線

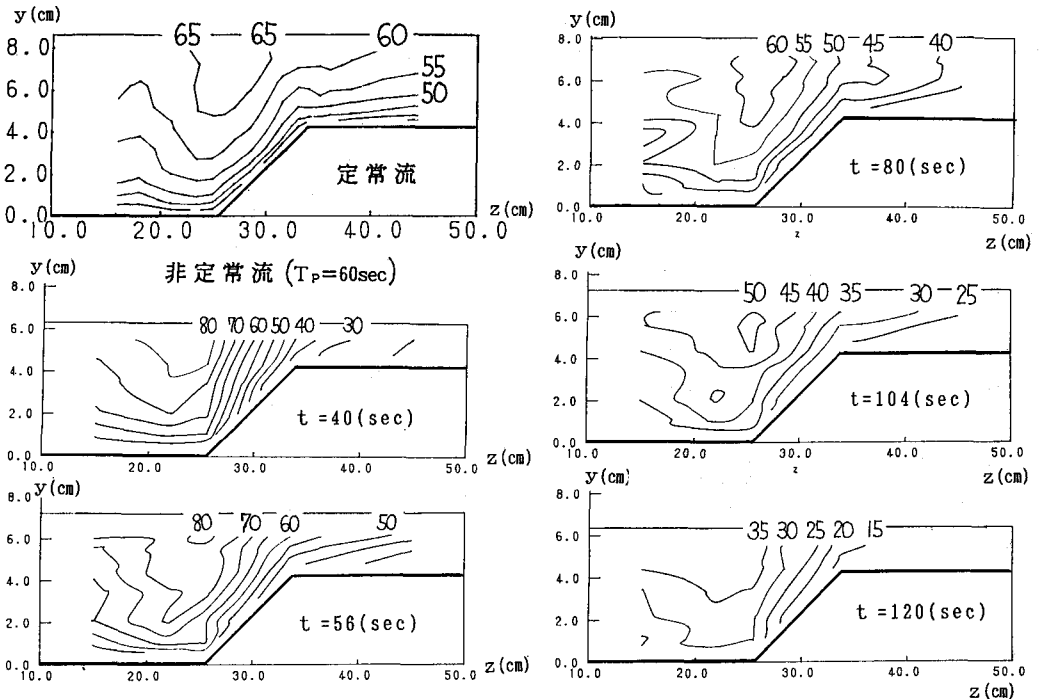


図-7 複断面水路の流れ構造の時間変化

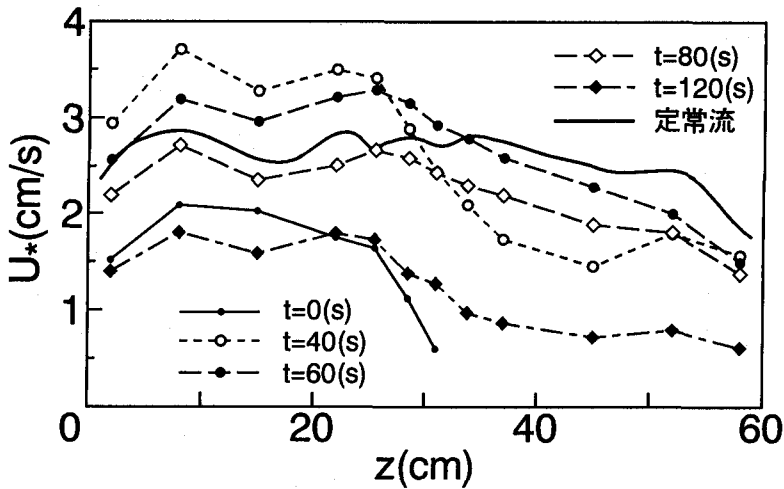


図-8 摩擦速度分布の時間変化

のコンターを定常流のものと比較すると、低水路の構造は比較的類似しているが、高水敷上の流速が非定常時にかなり遅いことがわかる。一方、減水期の $t=120\text{s}$ では、増水期よりも流速はかなり小さいが、分布形状は定常時の場合に近づいている。このように、複雑な断面を洪水が通過する場合は、非定常性の影響が部分的に強く現れる可能性があるといえる。

5. 摩擦速度の時間変化特性

主流速の鉛直分布は非定常流においても片対数プロットで直線分布し、対数則がほぼ成立することがすでに確認されている^{2), 5)}。複断面の場合も定常時は対数則が成立するが、今回の非定常流においても各時刻ごとに対数則の成立が確認され、これより摩擦速度を評価できた。摩擦速度の横断分布の時間変化特性を示したものが図-8である。図には $Q=2000\text{cm}^3/\text{s}$ の定常流の場合の結果も示している。まず、 $t=0$ では高水敷に流れがなく、 $t=40\text{s}$ では低水路・高水敷とも増大するが、低水路ではピーク流量に対する定常流の値を越えて最大値をとり、その後は減少していく。高水敷ではその後さらに増大し続け $t=60\text{s}$ で最大に達するが、定常流の値より小さい値を示している。ただし、エッジ付近では定常流の値にまで達する。これから注目すべき点は、増水期にはピーク流量を定常流として流したときの底面せん断応力よりも大きな値が発生することであり、低水路の護岸の設計に際しては注意が必要である。この増水期のせん断応力の増加率は $Tp=60\text{s}$ の場合で定常流の20%までに達し、しかも非常に早い時間に出現する。長方形断面においても増水期に底面せん断応力が増大することが知られているが、複断面では低水路でこの傾向がさらに強くなり、河床変動や浮遊砂輸送が増水期に活発化すること^{6), 9)}の一因になっているものと考えられる。

6. 乱れの時間変化について

洪水通過時の乱れ強さの評価については、高周波成分除去の手段としてフーリエ変換による方法と移動平均による方法があるが⁶⁾、ここではプロベラ流速計があまり時間応答がよくないこともあり、簡単のために移動平均による方法を採用した。流速の瞬間時系列から移動平均値を差し引き乱れ成分を取り出し、平均流速と同様に4秒間の区間平均により乱れ強度を求めた。これはあくまで参考値であり、相対的な評価に用いることとする。図-9は、低水路上、境界部角及び高水敷上の代表位置における u' の時間変化を示したものである。低水路では、流速のピークになる $t=40\text{s}$ よりも遅れてピークが現れている。低水路・高水敷接合部の角部では、高水敷に流れが乗り上げた直後から大きな乱れを示している。これは、等流速線の時間変化の

ところで述べたように、このときに横断方向のせん断が定常時にも増して最も大きくなり、乱れ発生が大きくなったためと考えられる。高水敷上では、流速のピーク時にほぼ乱れのピークが現れ、ほぼ平均流速に比例した乱れを示している。

7. あとがき

複断面水路を洪水波が通過するとき、単断面とは異なるいくつかの特性が明かとなった。複断面の場合、単断面に比べて低水路で非定常性が著しく強くなり、流速のピークがかなり速い時間に現れるようになる。流入流量のピーク時間をかなり長くしても低水路でこの非定常性が残り、全流量のハイドログラフもループを描く。高水敷では低水路に比べて非定常性は弱く、ピーク時間が長くなると疑似的な定常状態に近づく。複断面の3次元乱れ構造から増水期には低水路高水敷の境界部で流速差が著しくなり、強いせん断が発生し乱れが大きくなることがわかった。また、摩擦速度は低水路において増水期にピーク流量の定常流の値を大きく上回る。以上、注目すべき知見が得られたが、今後は、横断方向流速や2次流の変化特性を調べるとともに、いろいろな複断面形状についてさらなる研究が必要であると考えられる。最後に、本研究は河川環境管理財団の補助を受けて行われた。記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 冨永晃宏・江崎一博・小葉竹重機：複断面開水路流の3次元乱流構造、土木学会論文集、第417号/II-13、pp.129-138、1990
- 2) 林泰造、大島正意：Kinematic Waveとしての洪水の非定常性が水流の乱れ構造に及ぼす影響に関する研究、第32回水理講演会論文集、pp.607-612、1988
- 3) 湯下孝司、冨永晃宏、小葉竹重機：非定常開水路流の乱流構造、土木学会第44回年次学術講演会、II-207、pp.484-485、1989
- 4) Tu, H. and W.H. Graf : Velocity Distribution in Unsteady Open-Channel over Gravel Beds, J. Hydrascience and Hydraulic Engineering, vol.10, No.1, pp.11-25, 1992
- 5) Nezu, I., H. Nakagawa, Ishida, Y. and Fujimoto, H. : Effects of Unsteadiness on Velocity Profiles over Rough Beds in Flood Surface Flows, Proc. of 25th IAHR Congress, vol. A1, pp.153-160, 1993
- 6) 清水康行、板倉忠興、岸力、黒木幹雄：昭和56年8月洪水における石狩川下流部の河床変動について、第30回水理講演会論文集、pp.487-492、1986 他
- 7) 福岡捷二他：澗沼川における洪水流と河床変動の研究、土木研究所報告、第180号の2、1990
- 8) 高橋保：一様水路の不定流、京都大学防災研究所年報、12号B、pp.515-527、1969
- 9) 木下良作：石狩川下流部における洪水時の濁度鉛直分布と流れの構造について、水工学論文集、第34巻、pp.463-468、1990

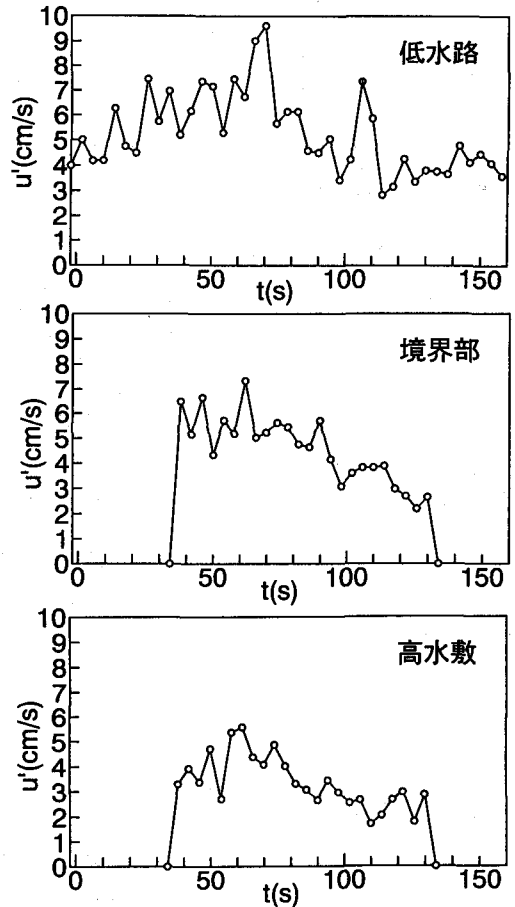


図-9 乱れ強度の時間変化