

流速変動と浮流砂濃度に関する実験的研究

Experimental study on velocity fluctuation and concentration of suspended sediment

九州大学工学部 正 員 平野宗夫
九州大学工学部 正 員 ○大本照憲
九州大学大学院 学生員 松枝修治

1. はじめに

実河川の大規模乱流運動は、河床近くで発生した強い上昇渦が河床の砂を含んで浮上し間欠的に水面が黒く盛り上がるBoilとして観察され、また横断方向には水深規模のスケールで高速渦と低速渦が交互に規則的に配列した縦筋として見い出されている。一方、固定床開水路流れにおいては、バースティングと呼ばれる組織的渦運動が壁面の粗滑、形状にあまり影響を受けず普遍的に存在し、¹⁾ 低速の流体塊の上昇流と高速の流体塊の下降流とが交互に発生する規則的なパターンを呈すること、およびせん断乱流に本質である乱れエネルギーの発生を支配すること等が明かにされている。本研究は、浮流砂の巻き上げに及ぼすこれらの組織的渦運動の影響を明らかにすることを目的とし、粗面上の開水路流れに、水路上流端より幅方向に一樣な連続的給砂を行ない、河床に発生した縦筋箇所において流速と濃度を測定し、各々の変動量の特性および相関関係について検討を加えたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は、全長10m（測定長8m）、幅30cm、深さ30cmの長方形断面をもつアクリル樹脂製の可変勾配水路である。河床には、粗度として中央粒径 $d = 2.9\text{mm}$ のポリスチレン粒子を水路全体に亘って一樣に張り付け、水路上流端には幅方向に一樣で定常的給砂の可能な供給装置を取り付けている。

流速測定にはコニカル型ホットフィルム流速計を用い、水深計測には1/10mm読みのポイントゲージを使用し、流量測定には流量ますを用いた。浮流砂濃度の計測には、光学式濁度計を用いた。浮流砂の濃度と出力電圧とは良好な比例関係を示した。また、管径 2mmの銅管を用い、採水速度を計測点における局所平均流速に近い所でサイフォン方式によって採水して浮流砂濃度を測定し濁度計からの読みと同程度であることを確認した。

測定は、水路上流端に設置した給砂器より4.7 m下流位置において、鉛直方向には $y=0 \sim 20\text{mm}$ の間では2mm間隔、 $y=20\text{mm}$ より水面までの間では4mm間隔、横方向には水路中心より両側壁へ向かう約 100mmの間を、約

表 - 1 実験条件

実験番号	流 量 $Q(\text{l/s})$	水 深 $H(\text{cm})$	水路勾配 I_b	粒径 $d(\mu)$	摩擦速度 $U \approx \sqrt{gH I_b}$	Froude数 Fr	Re数	抵抗係数 $C_x 10^{-2}$	断面平均濃度 $C_m(\text{ppm})$
R-1 a	3.57	3.90	1/350	清流	3.62	0.558	13450	2.20	-
b	"	3.90	"	74-110	2.66	0.494	11900	1.52	453.9
c	"	3.96	"	110-130	3.02	0.490	11900	1.98	478.9
d	"	3.96	"	130-149	2.81	0.513	11900	1.61	484.6
R-2 a	4.88	4.19	1/300	清流	3.70	0.606	16300	1.81	-
b	"	3.84	"	74-110	3.37	0.691	16300	1.27	844.3
c	"	3.96	"	110-130	2.66	0.659	16300	1.25	875.0
d	"	3.96	"	130-149	3.24	0.659	16300	1.25	893.4
R-3 a	6.11	4.20	1/200	清流	4.59	0.756	20400	1.72	-
b	"	4.15	"	8号	4.39	0.765	19500	1.51	973.8
c	6.07	4.05	"	8号	4.46	0.798	20400	1.57	693.57
d	6.07	4.00	"	7号	4.46	0.808	20200	1.56	616.14
R-4 a	6.10	4.30	1/200	清流	4.45	0.730	20300	1.77	-
b	"	3.97	"	74-110	4.32	0.821	20300	1.42	675.4
c	"	4.04	"	110-130	4.54	0.800	20300	1.63	700.0
d	"	3.70	"	8号	4.22	0.913	20300	1.18	690.2

1/5・Hの間隔に取って行なわれ、流速と濃度の同時・同位置測定および流速と濃度の単独測定を行なった。

流速計、濁度計からの出力電圧は、一旦データレコーダに記録し、サンプリング周波数 100Hz（一部75Hz）でAD変換されたのち、各々4096個のデータとして大型計算機により統計処理されている。

なお、実験条件は表-1にまとめられている。

3. 実験結果とその考察

写真-1は、R-3 dの実験条件において河床に形成された縦筋を撮影したものである。水路側壁から1/4・H離れた隅角部および水路中央部に計4本の安定した縦筋が見出せる。隅角部の縦筋は、側壁によって誘起された二次流によるものと考えられる。水路中央部に見られる縦筋の中央の間隔は、水深の1.3倍で、今本・大年⁽⁴⁾によって測定された平均縦筋間隔1.4・Hに近い値を示している。

写真に見られるように、縦筋が一定の間隔で形成されていないのは、幅方向に縦渦の強さが一様ではなく、その結果として縦筋に淘汰の生じた可能性が考えられる。以下に、縦筋に着目した流速と濃度の測定結果について述べる。

3・1 平均流速分布および濃度分布

図-1は、写真-1に示された縦渦の湧昇部（給砂器の投入口より4.0m下流）で測定された平均流速分布と濃度分布である。図中の実線はRouse分布式を示し物質輸送係数と運動量拡散係数との比 $\beta=1.2$ とし、カルマン定数を $\kappa=0.2$ としてプロットしたものである。実測された濃度分布は、実線で示されたRouseの濃度分布に比べてかなり一様であり、河床では縦渦が浮流砂を縦筋に集中すると同時に鉛直方向への拡散にも寄与することが示唆される。固定床粗面上の浮遊砂流では、清水流に比べて流速が大きくなるのが古くより知られているが、同様のことは縦筋上の流速分布についても認められる。

今本・大年⁽³⁾は、 $Fr \geq 1$ の射流で系統的な実験を行ない、抵抗特性に及ぼす濃度の影響を詳細に検討した結果、抵抗特性は砂粒レイノルズ数に支配され、粗面では浮流砂濃度と共に増大すると指摘している。以上のこと

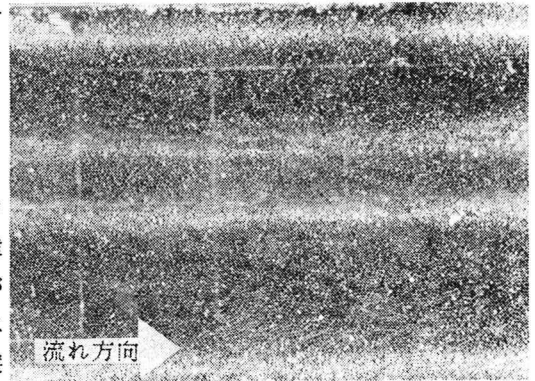


写真-1 縦筋河床

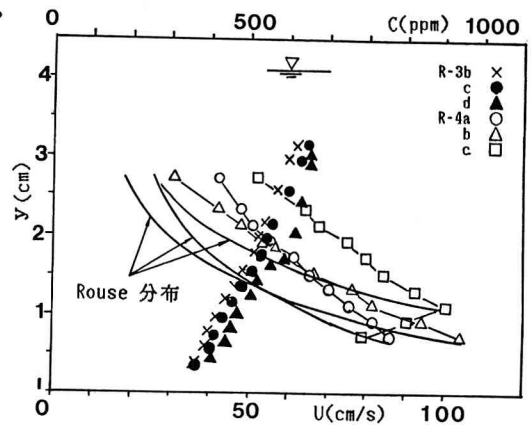


図-1 流速 u 濃度での鉛直方向分布

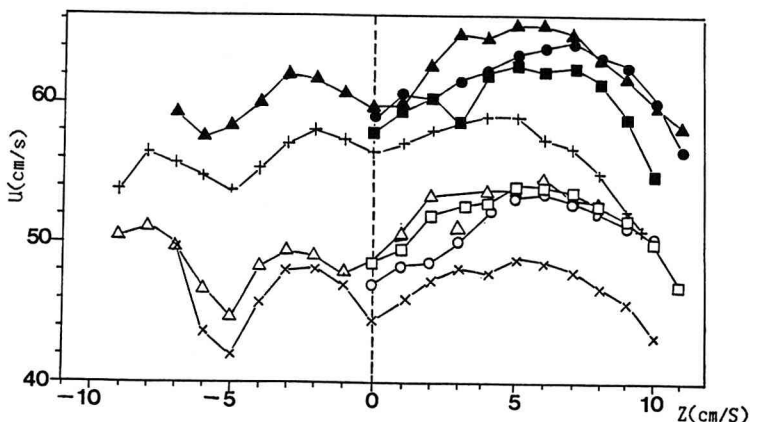


図-2 流速の幅方向分布

$y=10\text{mm}$ $y=23\text{mm}$
 R-3a $\times$ $\times$
 b $\circ$ $\circ$
 c $\triangle$ $\triangle$
 d $\square$ $\blacksquare$

は、 $Fr < 1$ の常流においても同様に成り立つことが表-1より認められる。目視によれば、珪砂に含まれた黒色の鉄粉が粗度間に充填され、一部は薄い層を成して掃流的運動をしていることが観察された。固定床粗面においては、浮遊砂流が清水流に比べて抵抗係数が小さくなり通水能力の高まるのは、浮遊砂が掃流的運動形態を取ることによって、路床粗度の後流が緩和されるためであり、今本・大年の推論が確認された。⁽³⁾

図-2は、流速分布の幅方向変化を示したものである。鉛直方向と同様に、浮遊砂流は清水流に比べていずれも流速が大きく、浮遊砂流、清水流とも写真-1に示した縦筋上で流速がくさび状に低下する規則的な波状分布形を示す。また、流速の幅方向変化率は、河床に近い $y=10\text{mm}$ のほうが $y=23\text{mm}$ に比べて大きく、しかも濃度とともに大きくなる傾向が見られる。 $y=25\text{mm}$ において測定された浮遊砂濃度は、縦筋上の低速度部では高速度部に比べて20%増であった。

3. 2 流速と濃度の変動特性

(1) 乱れ強度

図-3は、流下方向の乱れの強さが鉛直方向に変化する様子をプロットしたものである。R-1、R-2においては、河床に縦筋は現われず粗度が黒色の鉄粉によって被われたため、砂粒相当粗度は小さくなっている。従来、清水流に較べてあまり変化のないと言われた浮遊砂流の乱れの強さは、本実験ではいずれも小さくなっており、特に河床付近で顕著であることが認められる。乱れの強さを減少させる効果として、浮流砂を含むことによる有効粘性の増大が考えられる。しかしながら、これは同時に流速を減少させる働きをも持ち、実測データでは浮遊砂流の方が清水流に較べて大きな流速を示していることから、乱れ強さの減少には有効粘性の増加はあまり寄与していないものと考えられる。乱れの強さの減少は、粗度から発生する後流が浮流砂によって抑えられ、河床付近での乱れの構造が変化したことによるものと推察される。また、R-3はR-1、R-2に較べて、乱れの強さが浮遊砂流、清水流とも深さ方向にかなり一様な分布形を呈することがわかる。これは縦渦によって乱れエネルギーの鉛直方向への輸送が活発になったためであり、図-1に示す浮流砂濃度にも対応していることがわかる。

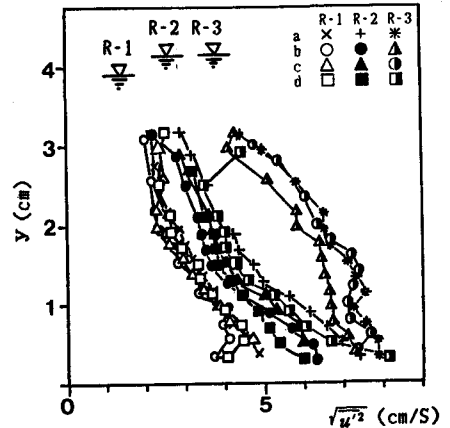


図-3 乱れの強さ $\sqrt{u'^2}$ の鉛直方向分布

図-4は、R-3における流下方向の乱れの強さの幅方向変化を示したものである。図-2に示す流速分布と同様に波状分布形状を呈することがわかる。一般に縦渦は時間的・空間的に不安定でかつその強度も小さいことから、中川・福津らは流れ方向に並列させた縦棧粗度を河床に配列し安定した縦渦を人工的に発生させた実験を行なっている。人工的に生じさせた縦渦では、乱れの強さが縦棧粗度上で急激に立ち上がり最大値を示す。本実験では、縦筋の発生する縦渦の湧昇部では乱れの強さは最大値を取らず流速の幅方向の変化率が極大に当たる所で最大となっていることがわかる。従って、縦筋と縦棧粗度では、乱れ構造が異なるもの

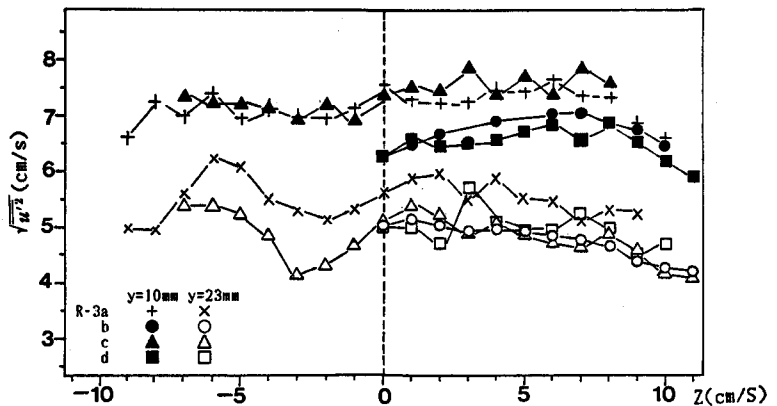


図-4 乱れの強さ $\sqrt{u'^2}$ の幅方向分布

と考えられる。また、図-3と同様に、浮流砂流は清水流に較べて乱れの強さが小さいこと、および乱れの強さの幅方向の変動の振幅が鉛直方向に減衰する割合は、図-2に示す平均流速のそれに較べて大きいことが認められる。

(2) 流速と濃度の確率密度

図-5は、サンプリング時間100Hzで離散化された瞬間的変動値を各々の標準偏差で正規化した確率密度分布の一例を示す。

流速、濃度とも、わずかにGauss分布より偏きしており、流速のモードは、河床付近で平均流速より大きく、半水深付近では平均流速より小さい。一方、浮流砂濃度のモードは、いずれも平均濃度より小さいことが認められる。乱れの発生機構の解明に、速度変動の非対称性が重要な鍵となったように、浮遊砂の浮上機構にも重要な因子と考えられる。

(3) 歪度

流速と濃度の確率分布に対して、各々の非対称性を詳細に調べるため、図-6に歪度の鉛直方向の変化をプロットした。図には、中川・彌津により求められた粗面乱流⁽⁶⁾ ($Fr=0.16$)における流れ方向および鉛直方向の歪度を示す。縦渦の湧昇部においては、浮遊砂流と清水流では、流速の歪度に大きな変化は見られず類似した分布形を呈するが、歪度が零を示すまでの高さは浮遊砂流の方が清水流に較べて若干大きく表われ、中川・彌津の実測値と傾向の大きく異なることが認められる。これは、縦渦の湧昇部では図-4に示すように河床近傍では、流速の幅方向の変化が大きく、側方からの高速流体塊の移流が間欠的に生じたことに起因するものと考えられる。

浮流砂濃度の歪度は、鉛直方向の乱れの歪度と相似な分布形を示し、流れ方向の乱れの歪度とはY軸に関してほぼ対称な形をしていることがわかる。

図-7は、流れ方向の歪度の幅方向変化を示したもので、図-4の流速分布を参照すれば、縦筋の中間部すなわち高速域では歪度は小さく、縦筋状の低速域では歪度は大きくなり、両者は逆位相の関係にある。また、

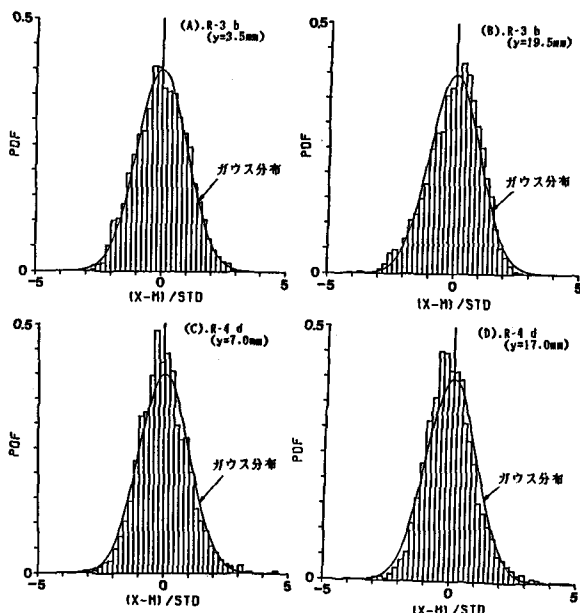


図-5 流速、濃度の確率密度分布

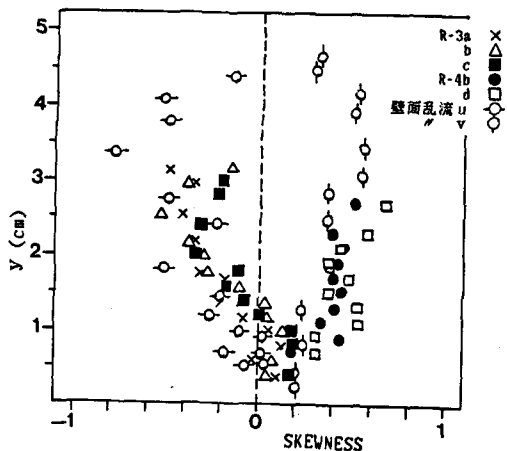


図-6 流速、濃度の歪度 (鉛直方向)

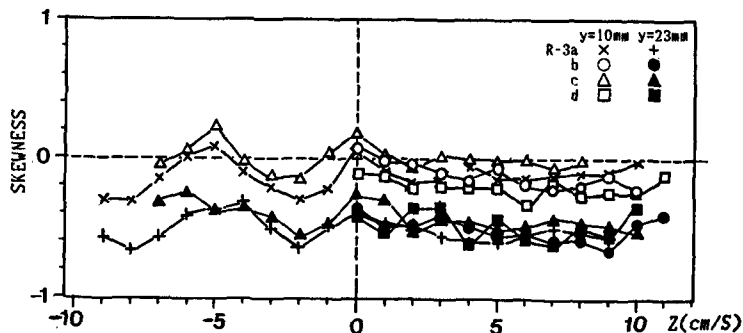


図-7 流速の歪度の幅方向分布

浮遊砂流は清水流に較べて、全体的に歪度が增大する傾向にあり濃度の増加とともにその傾向の強まることが認められる。

(4) 相関係数、バースティング周期

図-8は、流速と浮遊砂濃度の自己相関係数である。流速の自己相関係数は、浮遊砂流と清水流でほぼ似た分布形を示す傾向にあるが、lag time τ が大きくなると、浮遊砂流の方が清水流に較べて若干減少の度合いが緩やかとなっている。濃度の自己相関係数は、流速とほぼ同様な分布形を示すことがわかる。また、流速、濃度とも $\tau > 0$ で極大値のあることが認められる。Kim等は、自己相関係数がある遅延時間 τ で極大値を取り、この値と流れの可視化から求められたバースティング周期とはほぼ一致することを報告している。

(7)
Kimらの方法を用いて、縦筋上で求められたバースティングの発生周期は $T \cdot U/H = 2 \sim 5$ 、同様の方法によって濃度の極大値から求められた $T \cdot U/H = 1.5 \sim 3$ を示し、流速から求められたバースティングの発生周期は濃度から求めたそれに較べて大であった。この方法では、種々の時間スケールをもつ組織渦を長

時間に亘って平均化するため、極大値が平滑化されデータにかなりのバラツキが見られ、縦渦の湧昇部では浮遊砂流と清水流でバースティング周期に顕著な差は見られなかった。図-9、10は、縦筋の発生していない R-2 で求められたバースティング周期である。値はかなりばらついているが、浮遊砂流の方が清水流に較べてバースティングの発生周期は大きくなる傾向にある。図-3に示すように浮遊砂流で乱れの強さが減少したのは乱れエネルギーの発生を支配するバースティングの発生周期が小さくなるためであると推測される。

(5) 乱れのエネルギースペクトル

浮遊砂を含む流れは、清水流とは乱れの構造が異なるとの考えから、乱れのエネルギースペクトルを求めた。図-11は、縦渦の湧昇部において、河床から $y=6\text{mm}$ ($y/H=0.15$) における浮遊砂流と清水流の乱れのエネルギースペクトルを示したものである。図から、スペクトルエネルギーは、低周波数域では、浮遊砂流の方が清水流に較べて小さく、高周波数域では両者はほとんど一致していることが認められる。浮遊砂流で乱れの強さが小さくなるのは、低周波数域の比較的スケールの大きな渦のエネルギーが減少するためであると推察される。

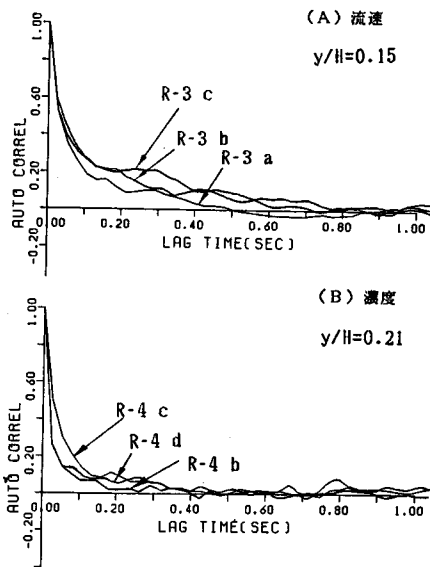


図-8 自己相関係数

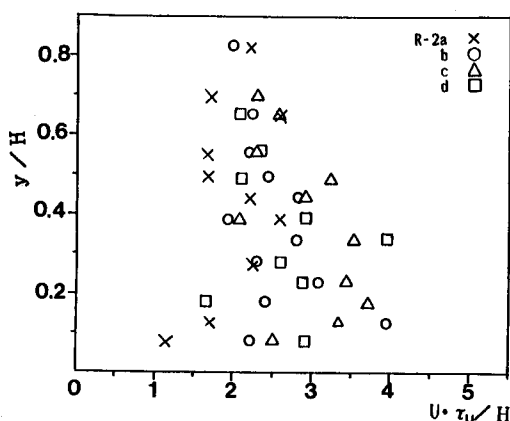


図-9 バースティング周期の鉛直方向分布

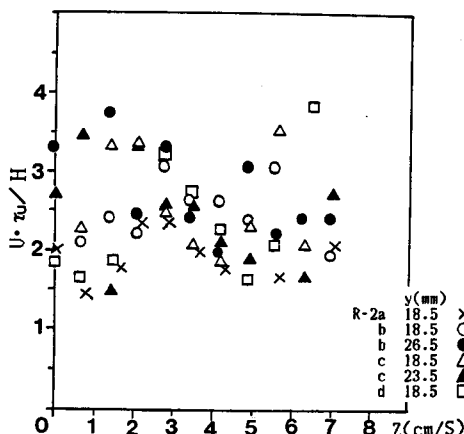


図-10 バースティング周期の幅方向分布

4. まとめ

本研究は、浮流砂に及ぶ組織的渦運動とりわけ縦渦の影響明かにするため、流速計測および濃度計測を行ない、各々の平均特性および変動特性に対して実験的検討を加えたものである。得られた成果を要約すると以下のようである。

(1) 平均流速は、幅方向に波状分布を呈し、縦筋上においてくさび状に低下する。

(2) 固定床粗面の浮遊砂流では、清水流に較べて乱れの強さは減少することが確かめられた。

(3) 乱れの強さの極大値が縦筋上ではなく流速の幅方向変化率が極大に当たる所で起こることから、縦筋と縦筋粗度とでは乱れの構造は異なることが示唆された。

(4) 流速と浮流砂濃度の確率分布は、Gauss 分布からわずかにずれて非対称である。

(5) Second Mild Maximum によって求められたバースティングの発生周期は、浮流砂流の方が清水流に較べて大きくなる傾向にある。

(6) スペクトルエネルギーは、高周波数域では浮流砂流と清水流とはほぼ一致し、低周波数域で浮流砂流の方が清水流に較べて小さくなることが認められた。

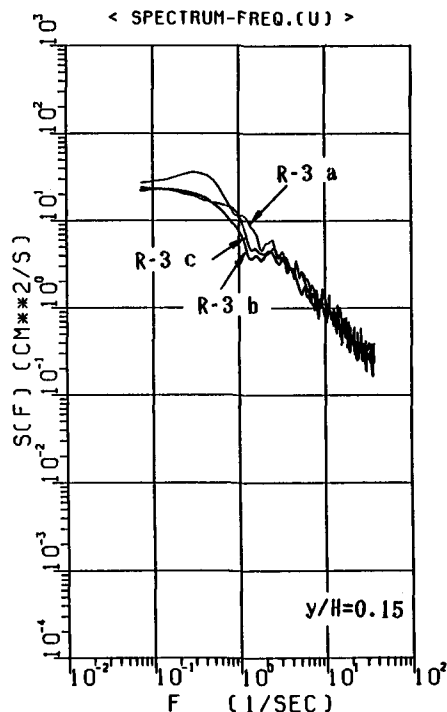


図-11 パワースペクトル

<参考文献>

- 1) 木下良作(1984), 土木学会論文集 NO.345, PP.1-19
- 2) Grass, A.J.(1971), J.Fluid Mech., Vol.50, PP.233-255
- 3) 今本・大年(1979), 京大防災研究所年報 NO.22, B2, PP.453-468
- 4) 今本・大年(1980), 京大防災研究所年報 NO.23, B2, PP.373-392
- 5) 中川・福津・富永(1981), 土木学会論文集 NO.312, PP.93-105
- 6) H.NAKAGAWA, I.NEZU(1977), J.Fluid Mech., Vol.80, PP.99-128
- 7) KIM, H.T., Kline, S.J. & Reynolds, W.C.(1971) J.Fluid Mech., Vol.50, PP.133-160