

浮遊粒子を含む流れの乱流特性に関する実験的研究

Experimental Study on Turbulent Characteristics in a Flow with Suspended Particles

九州大学工学部 小松利光 Toshimitsu KOMATSU

九州大学工学部 柴田敏彦 Toshihiko SHIBATA

九州工業大学 朝位孝二 Kouji ASAI

Characteristics of turbulence in a flow with suspensions of neutrally buoyant and sinking particles are investigated experimentally. The turbulent field generated by an oscillating grid was adopted for measurements. Since there is no mean shear flow in it, the steady state can be easily attained.

A variety of sedimentation velocities of particles are provided by using salt water, the density of which can be easily controlled. The turbulence is measured by LDV and the effect of sedimentation velocity of particles on turbulent properties are discussed. It should be noticed that increasing sedimentation velocity of particles results into smaller turbulent intensity.

Keywords : sedimentation velocity, suspended particle,
turbulent characteristics

1. まえがき

固液混相流における浮遊粒子の存在が乱れや平均流速分布に及ぼす影響については、河川における土砂輸送の問題などに関連して多くの研究が重ねられてきた。しかしながら、定常な混相流を作りかつ正確な乱流計測を行わなければならないという実験上の困難さと現象それ自体の複雑さの故に、得られた知見には一見相反するものなども含まれており、その詳細については不明な点がまだ多く残されている。

著者らは以前より平均せん断流の存在しない最もシンプルな乱れの場合である振動格子乱流を用いて、浮遊粒子の沈降 flux と粒子の乱流拡散のつりあった定常な固液混相乱流を作り、清水流との比較から沈降性の浮遊粒子が乱れや乱流拡散に与える影響について調べた¹⁾。また、粒子と同じ密度を持つ塩水を用いて中立浮遊粒子の濃度を系統的に変化させて乱れの計測を行い、中立浮遊粒子が乱れや拡散に及ぼす影響について検討を行った²⁾。しかしながらLDV, FLVを用いたため測定可能な濃度には上限があり、大きな粒子濃度の場合には測定できなかった。

本論文では更に大きな粒子濃度の乱流場の測定が可能となるようにいくつかの工夫を行い、より広範囲に渡る濃度の中立浮遊粒子が乱れに及ぼす影響について検討した。また粒子濃度を一定に保った条件のもとで流体の密度を操作することにより粒子の沈降速度を系統的に変化させて実験を行い、粒子の沈降速度が乱れ特性に及ぼす影響についても考察を加えている。

2. 実験方法とデータの解析

実験装置は前報¹⁾²⁾とほぼ同じなので簡単に述べる。水

平断面が25.4cm×25.4cm、高さ60cmの亚克力製水槽を用いた。水槽内に底面から20cmのところから水平格子を設置し、それを上下に振動させて乱れを発生させた(図-1)。格子は断面が1cm×1cmの角柱を組み合わせて作られており、格子の中心間隔は縦・横ともに10cmの正格子である。浮遊粒子としては0.8mm~1.2mmの間にふるい分けられたポリスチレン粒子(平均粒径 $d_m=0.974\text{mm}$ 、比重 $\sigma=1.0352$)を用いた。格子の振動周波数は4.0Hz、ストロークは6.0cmである。流速の測定にはLDVを用いたが、粒子の体積濃度Cが大き

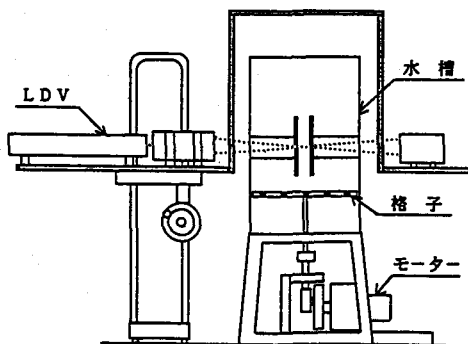


図-1 実験装置

なると、レーザー光が通過しなくなる。そこで乱れ測定部を除くレーザー光の通過区域に内径3cmの小円筒を設置して光路への粒子の侵入を防いだ(図-1)。座標系は格子の平均位置に水平方向にx-y平面をとり、y軸が小円筒と平行になるように設定した。また鉛直上向きがz軸である。

乱れの測定にはLDVを用いて同一点で水平方向の乱れ(u)と鉛直方向の乱れ(w)を2回に分けて測定した。濃度Cの測定にはモニター用として濁度計を用いたが、別に採水を行って正確なCを算定した。

実験は2つに大別される。Exp-Aは作業流体として粒子と比重をまったく同じに調整した塩水を用いる完全中立浮遊粒子の実験である。前報²⁾では、 $C=0.135\%$ 以上に粒子濃度を大きくすることはできなかったが、今回は上述の工夫により $C=0$ から最大 $C=1.83\%$ まで濃度を大幅に変化させて計測することが可能となった。測定点は $z=16\text{cm}$ の点とし、 $C=0$ から $C=1.83\%$ までCを10段階に系統的に変化させて計測した。測定時間は300sec、サンプリング間隔 $\Delta t=1/67.5\text{sec}$ 、データ個数はu, wについてそれぞれ16,384個として統計処理を行った。

一方Exp-Bは沈降速度の違いによる浮遊粒子の乱れへの影響の程度を調べるために行ったものである。このとき沈降速度 w_0 は浮遊粒子と周囲流体の間の密度差で決まるが、作業流体として塩水を使用し、その密度を調節することにより沈降速度を任意に変化させることができた。しかしながら、この実験では沈降によるfluxと粒子の乱流拡散がつりあって初めて平衡状態となって定常が保たれるため、沈降速度の大小により平均粒子濃度分布に変化が生じる。それで、このままでは濃度Cも変わってくるので、沈降速度の大小によらず定位置の測定点($z=1\text{cm}$)で濃度が一定となるように、濁度計により濃度をモニターしながら適宜粒子を加えたり抜いたりして調節した。この手順により、粒子濃度 $C \approx \text{const.}$ のもとで、沈降速度の大きさを系統的に8段階に変化させて、乱れに及ぼす影響を検討することができた。1実験につき測定時間300secの測定を5回実施した。サンプリング間隔やデータ個数はExp-Aと同じである。なお、Exp-Bでは内挿された小円筒の乱れに及ぼす影響を極力小さくするため乱れの測定部が幅3.4cmのスリット状になるように10cm×10cmの平板をそれぞれの円筒の先端部に貼付けている。

ところでExp-Aにおいて濃度が高くなるとレーザー光が粒子に当たって反応し、異常値を示す確率が高くなってくる。そこでExp-Aではしきい値を用いて判定し、異常値の場合はcutして直線内挿している。一方Exp-Bでは全実験を通じて測定点で濃度Cはほぼ一定なの

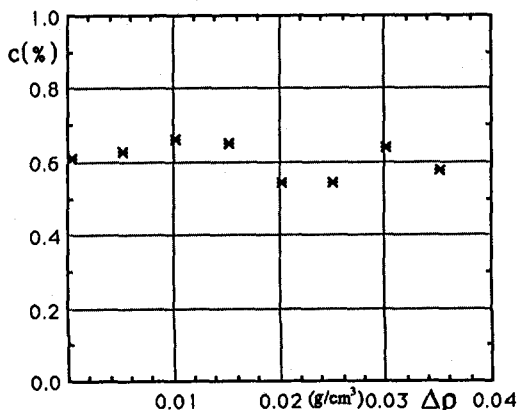


図-2 測定点の浮遊粒子濃度 (Exp-B)

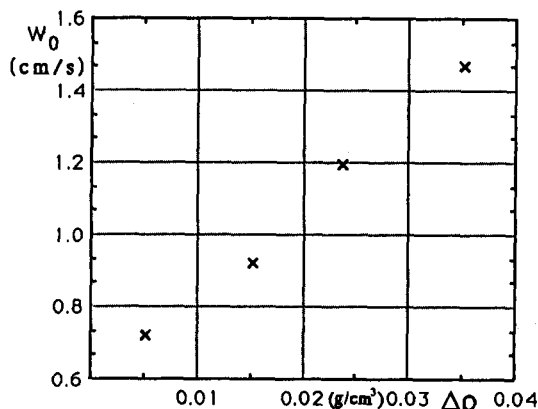


図-3 粒子の沈降速度と密度差の関係

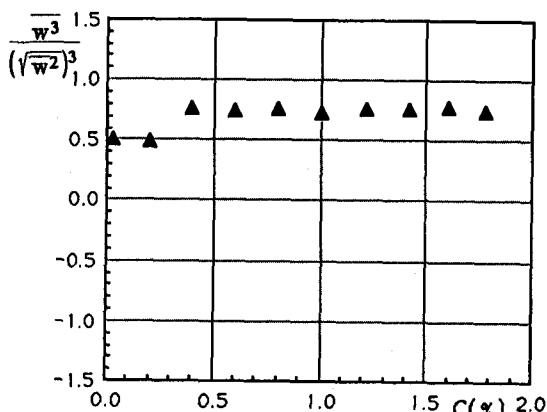


図-4 wの歪度 (Exp-A)

で、異常値を示す確率は同じと考える。従って特別な操作は行わず、単に弱いフィルターをかけてスミージングを行うのみにとどめている。Exp-Bにおける乱れの測定点の浮遊粒子濃度 C を図-2に示す。粒子と作業流体との間の密度差 $\Delta\rho$ が変化しても、濃度 C はほぼ CONST.にうまく保たれている。図-3に、実験に使用した粒子について密度差と沈降速度の関係を示す。密度差の増加に伴い沈降速度も一様に増加することが分かる。

3. 実験結果とその考察

3.1 乱れの歪度・尖度

水平方向の乱れ u については歪度が零であることが期待される。鉛直方向の乱れ w の歪度に及ぼす中立浮遊粒子の濃度の影響については、Exp-Aより得られた図-4に示されているように、粒子濃度 C の増加と共に増加する傾向にある。また、 u, w の尖度は図-5に示すように清水($C=0$)中の3.2程度の値から C の増加とともに大きくなっており、前報²⁾の $C=0\sim 0.135\%$ 場合の結果と一致している。

沈降速度が乱れの歪度・尖度に及ぼす影響についてはExp-Bの結果を用いて検討してみたが、沈降速度が増加しても歪度・尖度には大きな変化はみられず、 $w_0=0$ の中立浮遊粒子の場合とほとんど同じ値であった。

3.2 乱れ強度

中立浮遊粒子の実験は開水路流を用いて Elata & Ippen³⁾が、また管水路流を用いて林ら⁴⁾が実験を行い、いずれも中立浮遊粒子の存在により乱れが増加することを報告している。今回のExp-Aより得られた結果を図-6に示す。濃度 C の増加とともに u の乱れ強度はわずかな減少傾向を、 w の乱れ強度は明かな減少傾向を示している。これは従来の結果と相反する結果となっている。その理由は今のところ明かではないが、① 今回のExp-Aの実験では塩水を用いて完全中立浮遊粒子としており、また② 平均流速分布や摩擦損失係数などが清水流と浮遊砂流で異なってしまう従来の開水路や管路の実験と違って、粒子濃度を変化させた以外は完全に同一の条件で実験を行っているという2つの点から今回のExp-Aの実験により多くの妥当性と高い精度が期待できるように思われる。

一方、沈降速度 w_0 が乱れ強度に及ぼす影響についてはExp-Bの実験から図-7に u の乱れ強度を、図-8に w の乱

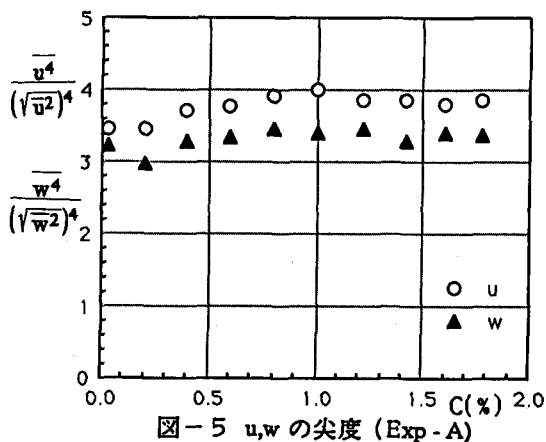


図-5 u, w の尖度 (Exp-A)

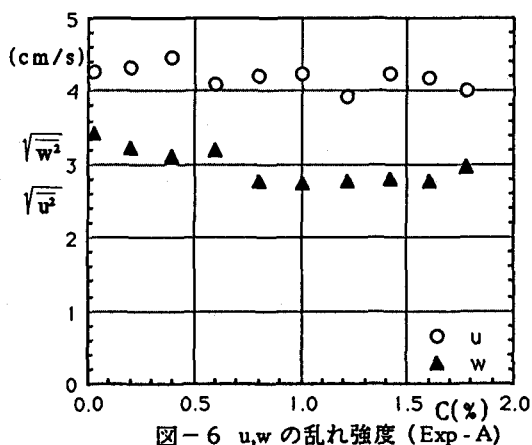


図-6 u, w の乱れ強度 (Exp-A)

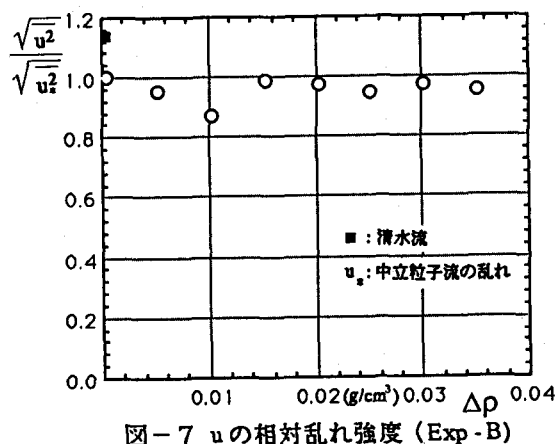


図-7 u の相対乱れ強度 (Exp-B)

れ強度を示す。両図に示されたプロットは1条件下5回の測定の平均値を表している。濃度が一定の条件のもとで密度差が大きくなって沈降速度が増大するに従い、wの乱れ強度は明かな減少傾向を示すのに対し、水平方向uの乱れ強度は中立浮遊粒子の場合からほとんど変化せずほぼ一定となっている。

中立浮遊粒子の濃度や沈降速度の大きさの乱流構造への影響の仕方が、水平方向の乱れuと鉛直方向の乱れwに対し大きく異なっているのは乱流場として振動格子乱流を採用したことが一因となっていると思われるが、いずれにしても中立浮遊粒子流では濃度の増加とともに、また、濃度一定の条件のもとでは粒子の沈降速度の増加とともに乱れは減少することを示しており非常に興味深い。

3.3 乱れのタイムスケール

乱れのタイムスケールに及ぼす浮遊粒子の影響について、日野⁵⁾は乱れのエネルギー方程式と加速度平衡式で構成された理論的考察から渦の寿命時間は粒子濃度の影響を受けて変化し、特に中立浮遊粒子の場合は、Cの増加とともに渦の寿命は減少すると予測している。

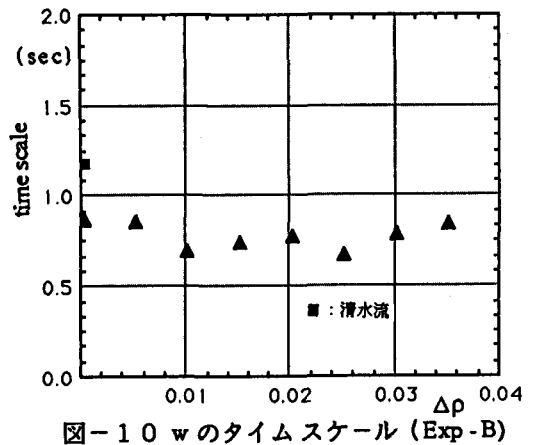
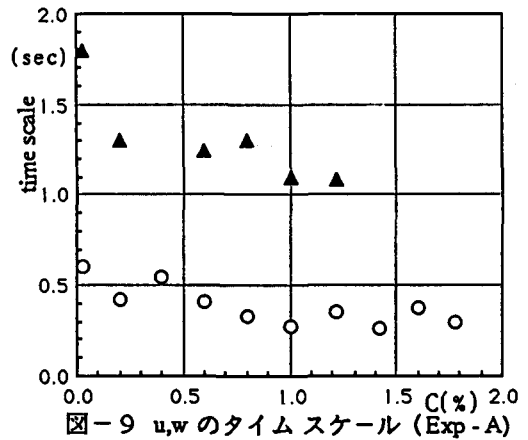
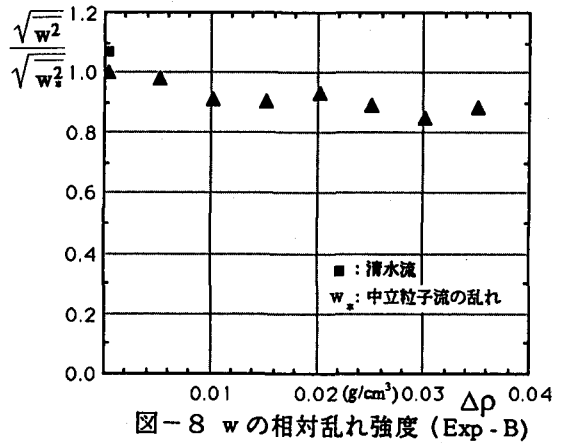
また小松ら¹⁾は沈降性粒子を含む振動格子乱流の実験から、浮遊粒子の存在によりタイムスケールは減少する傾向があることを示した。

今回のExp-Aの中立浮遊粒子の実験で得られた乱れの自己相関係数を積分することによって求めた積分タイムスケールをu, wについて図-9に示す。Cの増加により、いずれも減少傾向を示しており、日野の予測と一致している。

粒子濃度一定の条件下での沈降速度の影響については図-10にwについてのタイムスケールを示す。この図からも清水流に比べ中立粒子流ではタイムスケールが減少し、沈降速度が0から増加するにつれ、タイムスケールはさらに減少する傾向を持つことが分かる。沈降速度が大きくなると粒子と周囲流体との間の相対速度が大きくなり、粒子背後に生じる後流がスケールの小さい渦を発生させることによりタイムスケールを引き下げているものと思われる。今回の実験では乱れの長さスケールの計測は行っていないが、流体中の浮遊粒子の存在が乱れのタイムスケールを一方向的に減少させることから、“乱れの長さスケールも粒子の存在により減少する”ことが期待できるであろう。

3.4 乱れのスペクトル

浮遊粒子の存在する場合の乱れのスペクトルの変形についてはいくつかの知見が得られてる。林ら⁴⁾は中



立浮遊粒子流における乱れのスペクトルは清水流の場合と比較してその勾配が大きく異なり、 -1 乗則に近い勾配をとることを示した。平野・大木ら⁸⁾は浮粒砂流のスペクトルは清水流中のスペクトルに比べて低周波数側で小さくなることを観察している。また小松ら¹⁾は沈降性粒子を含む振動格子乱流の実験から u, w 共に浮遊粒子の存在する場合は清水の場合に較べて低周波数側でパワーが低下するのに対し高周波数側でパワーが増加し、そのためスペクトルの勾配は緩やかとなり、通常の $-5/3$ 乗則からより緩やかな -1 乗則に近づく傾向性が測定した全てのスペクトルに見られたことを報告している。今回のExp-Aで得られた中立浮遊粒子の場合の w のスペクトルを図-11に示す。

沈降性粒子の場合と同じように濃度 C の増加とともに低周波数側でパワーは低下し、高周波数側でパワーは増加して、その勾配が緩やかとなっているのが分かる。これは沈降性粒子の場合と同様以下の理由によるものと思われる。中立浮遊粒子が存在することによって粒子と流体との間にエネルギーのやり取りが起こる。比較的低周波数のスケールの大きい渦の運動が粒子を連行するとき、粒子に運動エネルギーを与えることとなり流体自身の乱れエネルギーは低下する。一方では粒子が流体に対して相対運動することにより粒子背後にできる後流が小規模で高周波の渦を多数発生させ、これが高周波数側のスペクトルのパワーの増加に寄与しているものと思われる。

前報²⁾の $C=0\sim0.135\%$ の範囲の測定では C の範囲が小さかったため水平方向の乱れ u のスペクトルには清水流の場合のスペクトルと較べてほとんど差が見られなかったが、今回のExp-Aでは u についても w と同様、 C の増加に伴って低周波数側でエネルギーは低下し、高周波数側で増大する傾向が明確にあらわれている(図-12)。

一定の濃度 C のもとで沈降速度が増大したときの乱れのスペクトルへの影響は図-13, 14に示されている。清水流の乱れは $-5/3$ 乗則に従うが、粒子が加わるとスペクトルは変形し、やはり低周波数側でエネルギーは低下し、高周波数側でエネルギーは増加してスペクトルの勾配は緩やかとなる。このスペクトルの変形は上述のメカニズムにより引き起こされているものと思われるが、唯、沈降速度の増加による変形の程度はそれほど大きいものではない。

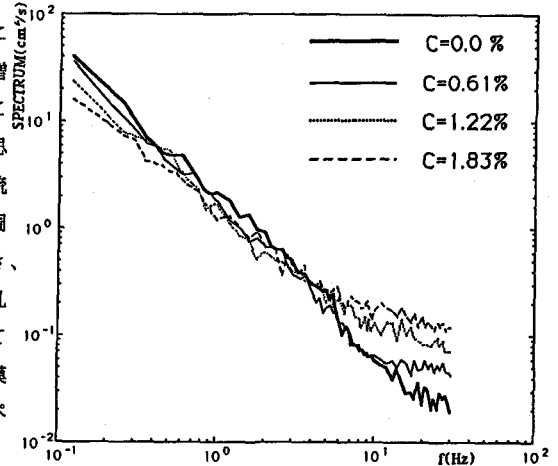


図-11 w のスペクトル (Exp-A)

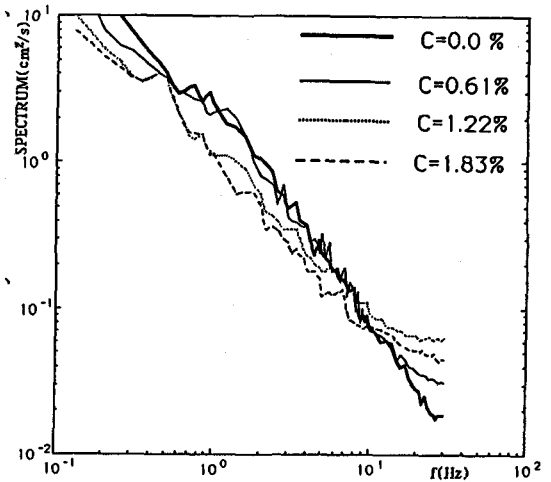


図-12 u のスペクトル (Exp-A)

4. むすび

いくつかの工夫を行うことにより、高い濃度の中立浮遊粒子を含む乱れの測定が可能となり、その結果広範囲の粒子濃度に渡って中立浮遊粒子が乱れに及ぼす影響を調べることができた。また沈降性粒子の濃度一定の条件のもとで沈降速度を系統的に変化させて実験を行い、粒子の沈降速度が乱れ特性に及ぼす影響についても明らかにすることができた。本研究で得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 乱れの至度・尖度は中立浮遊粒子の濃度の増加にともない大きくなるが、濃度一定のもとでは沈降速

度が中立の状態から段々大きくなっても歪度・尖度はほとんど変化しない。

(2) 乱れ強度および乱れのタイムスケールは中立浮遊粒子の場合濃度の増加とともに減少し、一方、沈降性粒子の場合は濃度一定のもとで沈降速度

の増加とともに同じく減少する。

(3) 乱れのエネルギースペクトルは u , w ともに中立浮遊粒子の濃度の増加とともに低周波数側でパワーは低下し、高周波数側でパワーは増大してその勾配が緩やかとなる。一方沈降速度の変化の影響も同様の傾向を示すが、それほど顕著ではない。

謝辞

最後に本研究の遂行にあたり献身的な協力をお願いした松田龍朋君（九州大学）ならびに山口正久氏（日本下水道事業団）に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小松利光・細山田得三・河野松夫・栗谷陽一：浮遊粒子を含む乱れ場の乱流特性と拡散、第32回水理講演会論文集、1988。
- 2) 小松利光・山口正久・朝位孝二・櫛利博：固液混相流の乱れ特性に関する研究、第33回水理講演会論文集、1989。
- 3) Elata, C. and Ippen, A.T. : The dynamics of open channel flow with suspensions of neutrally buoyant particles, Technical Report No.45, Hydrodynamics laboratory, MIT, 1981.
- 4) 林 泰造・佐藤邦明・青野利夫：中立浮遊粒子を含む水流の乱流構造に関する実験的研究、第30回水理講演会論文集、1986。
- 5) 日野幹雄：固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化、土木学会論文集、第92号、1963
- 6) 平野宗夫・大本照憲・松枝修治：流速変動と浮遊砂濃度に関する実験的研究、第30回水理講演会論文集、1986。

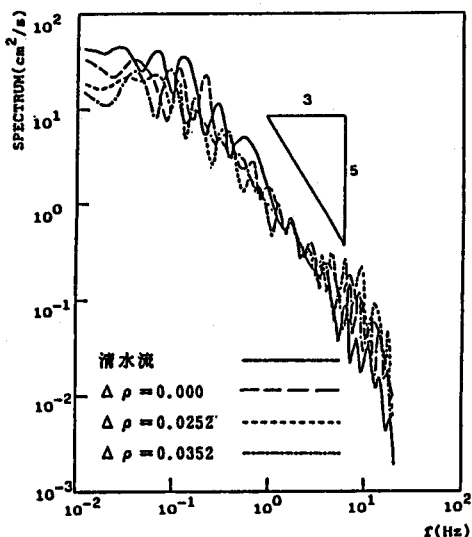


図-13 w のスペクトル (Exp-B)

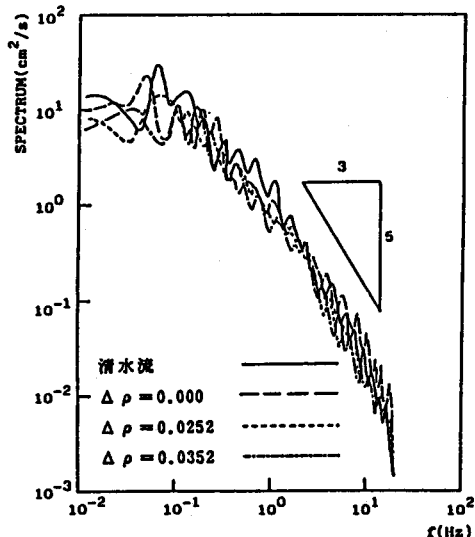


図-14 u のスペクトル (Exp-B)