

固液混相流の乱れ特性に関する研究

Study on Turbulent Characteristics in a Flow with Suspended Particles

九州大学工学部	小松利光	Toshimitsu KOMATSU
九州大学大学院	山口正久	Masahisa YAMAGUCHI
九州大学工学部	朝位孝二	Kouji ASAI
コロラド大学大学院	榊利博	Toshihiro SAKAKI

Characteristics of turbulence in flow with suspensions of neutrally buoyant particles are investigated experimentally. The turbulent field generated by an oscillating grid was adopted for the measurements. Because it has no mean shear velocity and the steady state can be easily attained. The turbulence with a variety of concentrations of particles was measured by FLV and LDV, and the effects of particles on turbulent properties are discussed. It should be noticed that increasing concentration of neutrally buoyant particles results into smaller turbulent intensity of w and gentler slope of spectrum of turbulence.

Keywords: neutral suspended sediment, turbulent characteristics, oscillating grid

1. まえがき

固液混相流における浮遊粒子の存在が乱れに及ぼす影響については、粒子の存在により変化した水流の平均流速分布形の予測の問題に関連して多くの研究が重ねられてきた。しかしながら現象の複雑なこともあって、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、詳細については不明な点がまだ多く残されている。固液混相流における乱流特性を知るためには、浮遊粒子を含む定常な流れを実現し、かつ正確な乱流計測を行わなければならない。著者ら¹⁾は以前、平均せん断流の存在しない最もシンプルな振動格子乱流を用いて、浮遊粒子の沈降と粒子の乱流拡散のつり合った定常な固液混相の乱流場を作り、非接触のLDV、FLVを用いて2方向の乱れの同一点同時測定を行って、清水流の場合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。

ところで、固液混相流の特別な場合として中立浮遊粒子を含む流れがある。中立浮遊粒子流の乱れの計測は、Elaia & Ippen²⁾が開水路流で、また林ら³⁾が管水路流で行ないいくつかの知見が得られているが、精度の高い実験が容易でないこともあって信頼できるデータは少なく、その乱流特性の多くが未知のまま残されている。

本論文では前報に引続き、定常な固液混相乱流場が容易に作れるという振動格子乱流の利点を生かして、中立浮遊粒子の場合について濃度を系統的に変化させて実験を行い、中立浮遊粒子が乱れや拡散に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法とデータの解析

2.1 実験装置

実験装置は前報¹⁾とほぼ同じなのでここでは簡単に述べる。水平断面が25.4cm×25.4cmの正方形で高さ80cmのアクリル製水槽を用いて実験を行った。水槽内に底面から20cmのところ

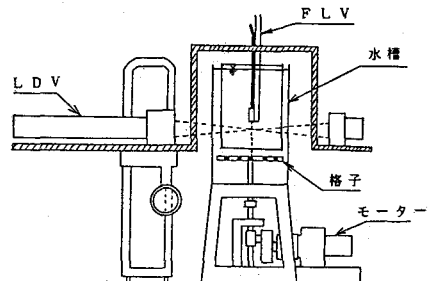


図-1 実験装置

実験番号	体積濃度 C (%)	記号
EXP-1	0.000	○
EXP-2	0.0211	△
EXP-3	0.0446	□
EXP-4	0.0879	◎
EXP-5	0.125	▲
EXP-6	0.135	■

た(図-1)。格子は断面が $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 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 の正方形格子である。なお、前回の実験では2次流がみられたが、これは正方形水平断面の4隅の直角部の影響が一因となっていると判断された。そこで今回は内管として直径 20cm 、厚さ 1mm のアクリル管を水槽内に鉛直に管の下端が格子の振動上端ぎりぎりまで接近するように挿入して固定した。座標系は格子の平均位置に水平方向に x 、 y 軸をとり、鉛直上向きに z 軸をとる。乱れの測定は x 方向の乱れ u をファイバー型レーザードップラー流速計 (FLV)、 z 方向の乱れ w をレーザードップラー流速計 (LDV) を用いて同一点で同時測定を行った。

今回の実験でも x - y 平面では乱れの特性は方向性をもたず一様であることが期待できるので、 y 方向の乱れ v は測定しなかった。中立浮遊粒子として $0.8\text{mm} \sim 1.2\text{mm}$ の間にふるい分けられたポリスチレン粒子 ($d_p = 0.826\text{mm}$) を用いた。粒子の比重は $\sigma = 1.045$ である。清水中ではこの粒子は $w_0 = 1.31\text{cm/s}$ の沈降速度を持つので、今回の実験では清水の代わりに比重が粒子と同じ塩水を用いて沈降速度が零となるようにしている。粒子の濃度 c は体積濃度とし、採水により測定したが、今回の実験では水槽内でほぼ一様であった。レーザー光が粒子に当たって反応した場合は異常値が発生するが、しきい値を用いて判定し、異常値の場合は cut し、その間は直線内挿した。

2. 2 実験条件とデータ処理

中立浮遊粒子の乱れに及ぼす影響ならびにその濃度に対する依存性を調べるため、他の実験条件はすべて同じにして粒子濃度 C を清水 ($c=0$) の場合を含む6通りに変化させて実験を行なった(表-1)。振動格子のストロークは 8cm 、周波数は 4Hz である。乱れの測定は水槽断面の中心に測線をとり、それぞれ1点につき130秒間測定し、データレコーダーに収録した。 z 方向の測定の間隔は格子近傍では密に (5mm 間隔) し、格子から離れるに従って徐々に粗 (1cm 、その後 2cm 間隔) とした。収録された u 、 w のデータはA-D変換の後、統計処理された。サンプリング間隔 $\Delta t = 1/37.5\text{ sec}$ 、1測点当りのデータ個数は u 、 w についてそれぞれ $N = 4096$ 個である。以下の考察では格子近傍と格子から離れた乱れの微弱な領域のデータは除いて、 $z = 14 \sim 22\text{ cm}$ のデータを中心に検討する。

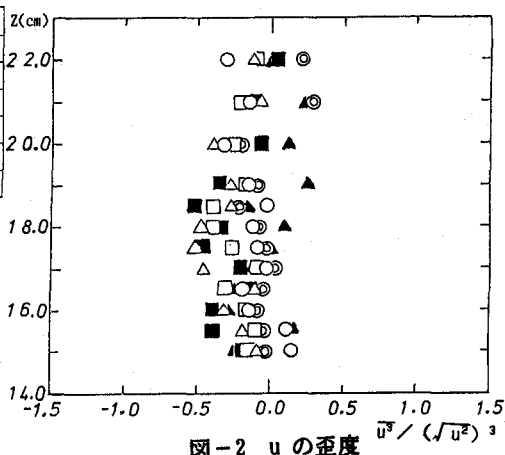


図-2 u の歪度

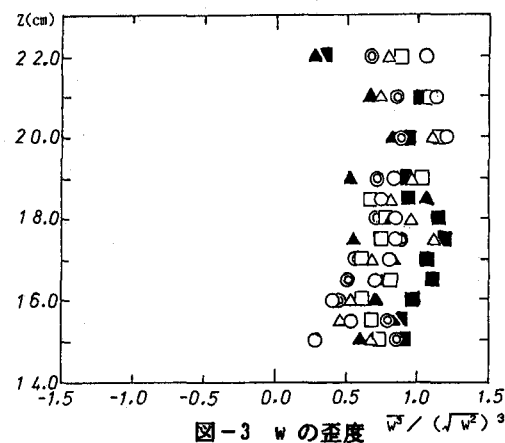


図-3 w の歪度

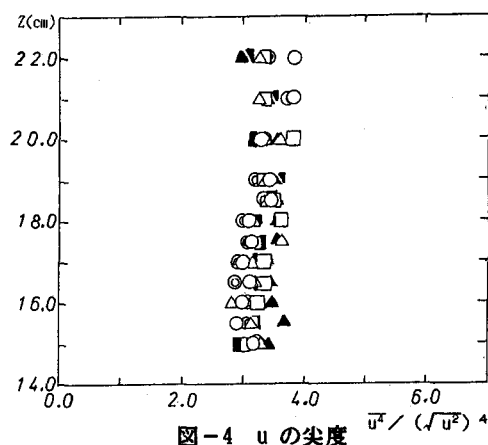


図-4 u の尖度

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。図-2に示されているように若干ばらつきはあるが零のまわりに散らばり、濃度 C による系統的な差はみられない。 w の歪度については、図-3に示されているようにあまり明確ではないが濃度の増加とともに大きくなる傾向を持つようである。前報¹⁾で報告した沈降性粒子の場合とは逆の傾向性を示している。

次に u 及び w の尖度を図-4, 5に示す。 u の尖度はほぼ 3.2 程度で濃度による影響は見られない。一方、 w の尖度は清水中の 3.2 程度から中立浮遊粒子濃度 C の増加に伴い、次第に大きくなっており興味深い。

3.2 乱れの確率分布

サンプリング間隔 1/37.5 (sec) で離散化された瞬間流速変動値 u , w を各々の標準偏差で正規化した確率密度分布の一例を図-6, 7に示す。 u , w ともに清水中では正規分布にかなり近い分布を示しているが、 w は濃度 C の増加とともにモードが負の側に移行し、値も突出してくる。これは前述の歪度・尖度の増加と一致している。一方、 u の分布は C が増加してもほとんど変化せず、ほぼ正規分布を示しており、歪度・尖度が変化しないことに対応する。

3.3 乱れ強度

沈降性の砂粒子を含む開水路せん断流の実験で今本・大年⁵⁾は流れ方向の u の乱れ強度が底面の粗滑に無

関係に水路床付近で清水流の場合に較べて大きくなることを報告している。一方、平野・大本ら⁶⁾はやはり砂を使った粗面の実験で u の乱れ強度は河床付近で清水流に較べて逆

に小さくなるという結果を得ている。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、浮遊粒子が乱れに及ぼす影響は水平方向の乱れと鉛直方向の乱れとでは異なってお

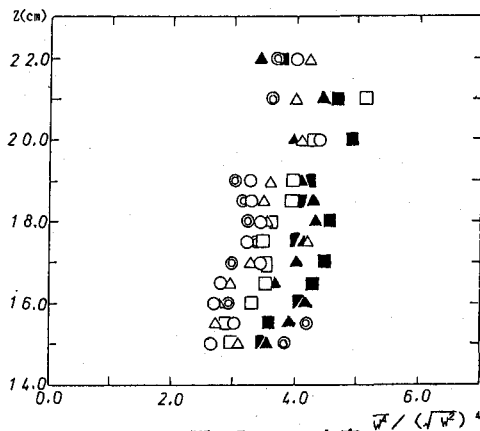


図-5 w の尖度

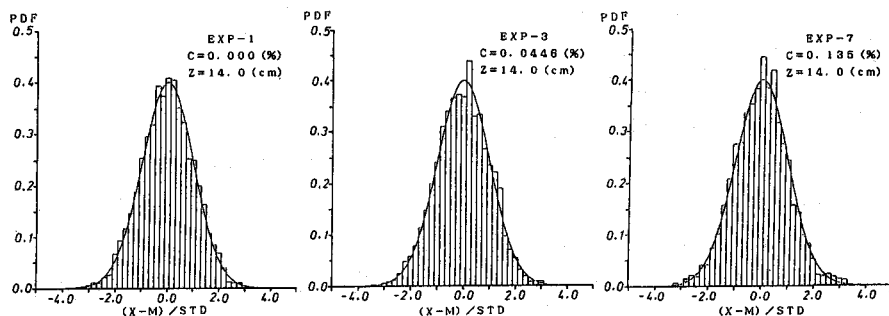


図-6 u の確率分布

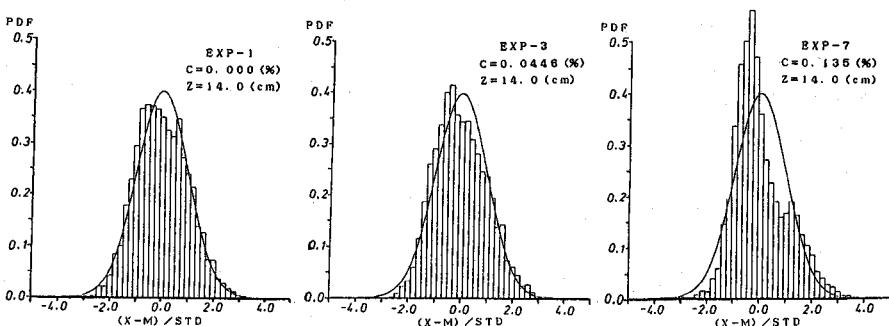


図-7 w の確率分布

り、 C が大きくなるにつれて u の乱れ強度は単調に増加するが、 w の乱れ強度は浮遊粒子の濃度勾配（密度勾配）の影響を直接受けるため C の増加に対し一旦極小値をとり、その後増加するという複雑な挙動を示すことを報告している。日野⁴⁾は理論的考察から乱れの強さは粒子の比重が 1 に近ければ濃度と共に増加の傾向を示すが、粒子の比重が 1 から離れている場合は濃度の増加とともに減衰するという結論を得ている。

中立浮遊粒子の実験は、開水路流を用いて Elata & Ippen²⁾ が、また管水路流を用いて林³⁾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。

今回の振動格子乱流の実験より得られた結果を図-8、9に示す。水平方向の u の乱れ強度は各 C の値に対しかなりばらついてはいるが、 C の増加に対し系統的な変化はみられずほぼ一定であると思われる。一方、 w の乱れ強度は C の増加に対し明らかに減少傾向を示している。これは従来の実験結果と相反する結果となっており、その理由は今のところ明らかでない。唯、今回の著者の実験と従来の実験の違いを挙げると

- (a) 従来の実験では濃度分布は一樣であるが、粒子は完全に中立ではなく、比重 1.05~1.06 の粒子を使用しているのに対し、今回の実験では粒子と周囲水の比重を全く同じにしている。
- (b) 従来の実験では流量などの実験条件を一定にして、清水の場合と中立粒子を含む場合のそれぞれの乱れの強さを比較していたが、平均流速分布や摩擦抵抗係数などは一定でなく変化していた。今回の振動格子の実験では元々平均流は存在しないので、中立粒子の有無だけが違いとなって乱れを比較することになっている。

振動格子から作業流体への運動エネルギーの伝達が清水と混相流では異なる可能性も残っているが、上述の2点を考慮すると今回の実験より得られた結果により多くの妥当性があるように思われる。

3. 4 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⁴⁾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時間は減少すると予測している。

一方、今本・大年⁵⁾は砂を用いた開水路浮流砂実験で、乱れのタイムスケールは砂粒濃度の影響をほとんど受けないことを報告している。小松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。

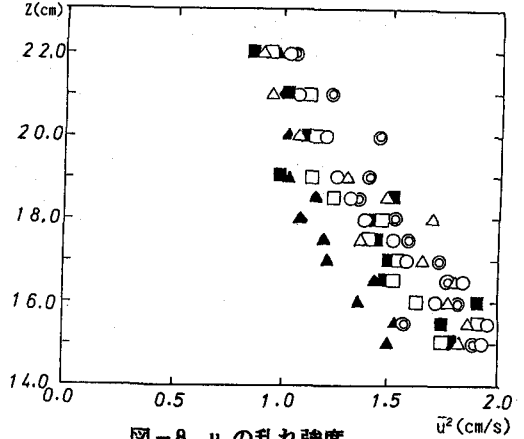


図-8 u の乱れ強度

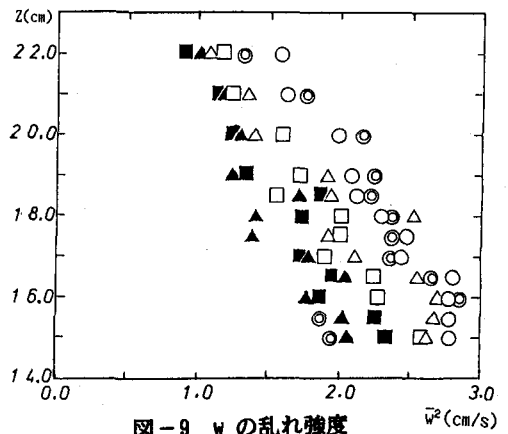


図-9 w の乱れ強度

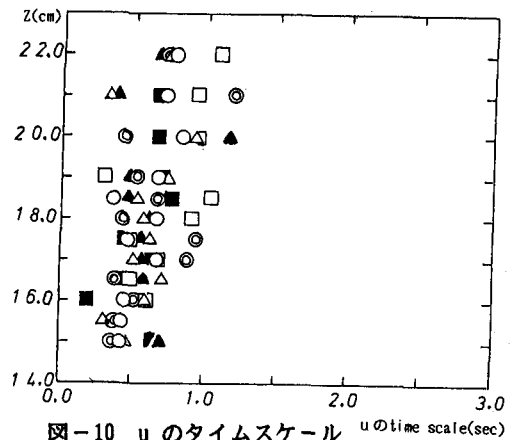


図-10 u のタイムスケール

今回の中立浮遊粒子の振動格子乱流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 についてそれぞれ図-10, 11に示す。 z の増加とともにタイムスケールはほぼ直線的に増加しているが、その割合は w の方が2倍程度大きい。実験値はかなり散らばっているが、 C の増加による系統的な変化は見られず、中立浮遊粒子は乱れのタイムスケールにそれ程影響を及ぼさないことが分かる。

3. 5 乱れのスペクトル

浮遊粒子が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いる。林ら³¹⁾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・大本ら⁶⁾は浮流砂流のスペクトルは清水流中のスペクトルに較べて低周波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 ともに浮遊粒子の存在する場合は清水の場合と較べて低周波数側でパワーが低下するのに対し高周波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。

今回の中立浮遊粒子を含む振動格子乱流の実験から得られたスペクトルの例を図-12, 13に示す。 w のスペクトルは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、高周波側ではパワーが増加して、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low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に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wake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。唯、今回水平方向の v のスペクトルについてはほとんど変化が見られなかった。

3. 6 乱れの渦動拡散係数

z 方向の乱れのturbulent flux F は次式により求められる。

$$F = (2 \overline{w u^2} + \overline{w w^2}) / 2 \quad (1)$$

また、乱れエネルギー q^2 は

$$q^2 = (2 \overline{u^2} + \overline{w^2}) / 2 \quad (2)$$

によって表され、実験的に決定される。turbulent fluxをFick型を使って表すと

$$F = -Kt \cdot \partial q^2 / \partial z \quad (3)$$

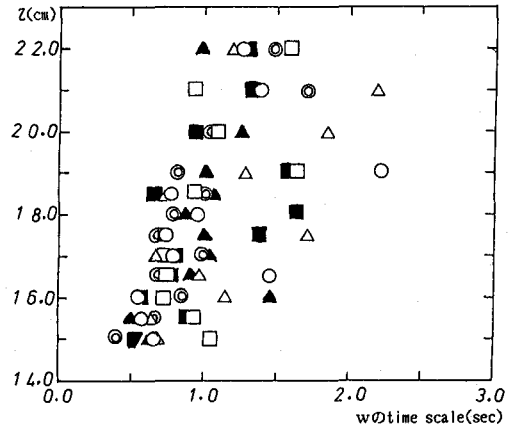


図-11 w のタイムスケール

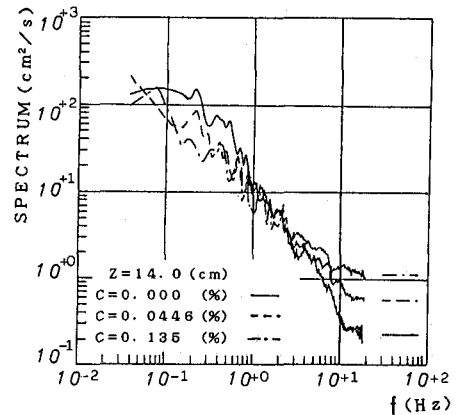
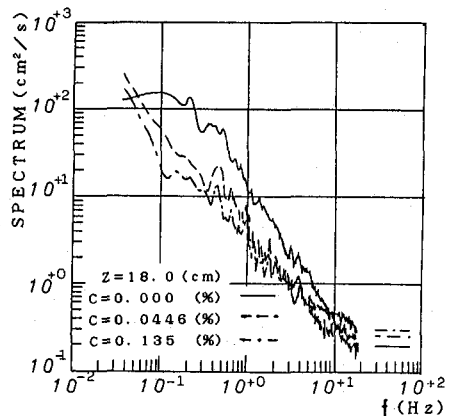


図-12 w のパワースペクトル



(1) 図-13 w のパワースペクトル

となり、乱れの渦動拡散係数 K_t を(3)式から逆算して決定することができる。清水の場合と中立浮遊粒子が存在する場合について K_t を求め、その一例を図-14に示す。渦動拡散係数は鉛直方向の乱れの強さと乱れのスケールの積に比例すると考えられるが、粒子の濃度 C が増加する場合は清水の場合と較べて乱れの拡散係数が減少する傾向がある。これは3.4で述べたように乱れのタイムスケールは中立粒子の存在によってもそれほど大きく変化はしないが、3.3に見られるように鉛直方向の乱れ強度が粒子の存在によって減少するためであると考えられる。

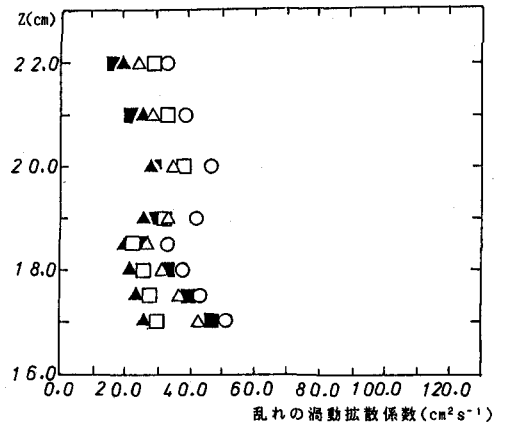


図-14 乱れの渦動拡散係数

4 むすび

中立浮遊粒子を含む乱れの場合の乱流特性を明らかにするため、塩水を用いて完全に粒子と比重を一致させた振動格子乱流の実験を行ない、粒子濃度の乱れに及ぼす影響について検討した。2次流を消すための工夫を試みたが、結局は完全に消すことが出来ず、データの散らばりの原因となってしまった。乱れ u と w に対する中立粒子の影響が随分異なっているが、これが普遍性を有するのか振動格子乱流の独特の傾向性なのか今のところ不明である。今後明らかにしていきたい。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) 中立浮遊粒子濃度 C の増加に従い、鉛直方向の乱れ w の歪度・尖度はともに大きくなる。
- (2) 水平方向の乱れ u の乱れ強度は濃度 C の増加にもほとんど変化を示さないが、 w の乱れ強度は減少する。
- (3) 中立浮遊粒子は乱れのタイムスケールには大きな影響を及ぼさない。
- (4) 乱れのスペクトルは沈降性粒子の場合と同様に中性粒子の存在により低周波側でパワーは低下し、高周波側で増大する。その結果、スペクトルの勾配は緩やかになる。
- (5) 乱れの渦動拡散係数は清水の場合と較べ低下する。

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柴田敏彦技官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・粟谷陽一：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) 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, 1961.
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 今本博健・大年邦雄：固液混相水路流れの水理特性に関する研究(1)，京大防災研年報，第22号B-2，1979。
- 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。