

中立浮遊粒子による乱流特性量の変化に関する実験的研究

九州大学大学院 学生員 ○竹内 美礼 押川 英夫

九州大学工学部 フェロー 小松 利光 正会員 柴田 敏彦

1. はじめに

本研究では平均流のない定常乱流である振動格子乱流場において粒子を中立浮遊させ、乱れの空間特性量の測定可能な実験装置を用いることにより、粒子の存在による流体の乱流構造の変化を調べることを目的としている。今回は同一条件における実験回数を大幅に増やすことによって信頼性の高い結果が得られたので、そこから得られた知見とその考察を報告する。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた装置の概要を図1に示す。水槽は長さ 200.0cm、高さ 50.0cm、幅 25.0cm のアクリル製で水槽底部から 20.0cm 上方にメッシュサイズ 4.418cm、棧幅 0.884cm の角柱正方格子を取り付け、それを鉛直に振動させることにより乱れを発生させた。計測には水槽と独立させたトラバース装置に取り付けた FLV(Fiber Laser Velocimeter)を使用し、それを水平方向に一定速度 22.0cm/s で滑らかに走行させながら流速の計測を行うことにより乱れの空間特性量を評価した。粒子は平均粒径 $d=2.19\text{mm}$ のポリスチレン粒子(比重 1.038)を使用し、塩で周囲水の比重調整を行い中立浮遊させた。測定断面は格子の振動の中心を $z=0$ とした $z=11.5\text{cm}$ の高さとし、粒子の体積濃度 C を 0, 0.05, 0.15, 0.30% の4段階に変化させて各 200 回の水平方向の流速を測定した。粒子濃度 $C=0$ (以後、清水と呼ぶ)での実験は粒子を混入した時と同比重の塩水を用いた。全実験を通じて格子の振動数は 4.0Hz、ストロークは 6.0cm、水面面までの距離は $z=25.0\text{cm}$ とした。

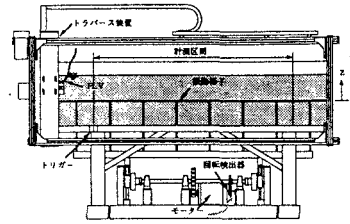


図1. 振動格子実験装置

3. 実験結果および考察

各条件に対する 200 回の測定結果を集合平均して得られた清水に対する乱れの波数スペクトル $F_{u0}(k)$ 、および粒子混入時の波数スペクトル $F_u(k)$ を示したものが図2である。測定回数を非常に多くしたため、スペクトルの波形は局所的な変動が少なく非常に滑らかなものとなっている。清水の結果である $F_{u0}(k)$ では、 $k>2$ の範囲において慣性小領域における $-5/3$ 乗スペクトルが明確に現れており、その領域においては精度の良い結果が得られていることが期待できる。 $k>20$ の領域では実験装置の性能上ノイズ等の影響により正確な測定が困難なため、今回は主に $2<k<20$ の波数帯についての考察を試みる。

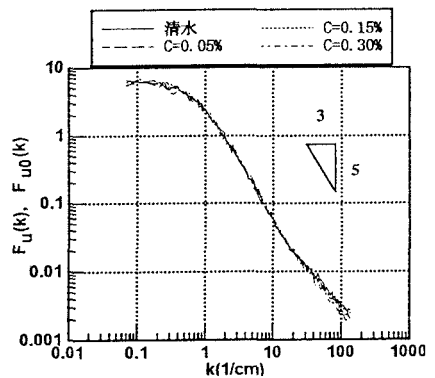


図2. 波数スペクトル

粒子を混入した場合のスペクトルの変形については、従来粒子混入の影響により波形の勾配が緩やかとなることが指摘されている(例えば林ら¹⁾) が、図2では変化が微小であり明確な差異は確認できない。そこで粒子混入による影響を明確にするため、各スケールの渦径を意味する $2\pi/k$ に対する粒径 d の比である $kd/2\pi$ を横軸に、 $F_u(k)$ と $F_{u0}(k)$ の比 $F_u(k)/F_{u0}(k)$ を縦軸としたものが図3である。なお、横軸 $kd/2\pi$ は Gore ら²⁾ が示した粒子混入による乱れ強度の増減を評価するための特性量 d/I (I は平均渦径) を拡張し、渦の各スケール毎の値としたものである。

実験結果から清水の乱れ強度に対する粒子混入時の乱れ強度の比を求めると、 $C=0.05, 0.15, 0.30\%$ に対してそれぞれ 1.007, 1.003, 0.9832 であった。その結果は、図3においてパワーの強い $kd/2\pi < 0.015$ の増減

の関係におよそ対応しており、今回はこの領域が乱れ強度の増減を支配した結果となった。前述の Gore ら²⁾の評価法によると今回の実験は $d/l = 0.19$ で乱れ強度は増えることになり、濃度の薄い $C=0.05, 0.15$ の場合は彼らの評価法にあてはまる。 $d/l = 0.19$ は乱れ強度の増減の境界値 $d/l = 0.1$ に近い値であったため、粒子濃度依存性が卓越し $C=0.30\%$ では乱れ強度が減少したとも取り得る。しかし $kd/2\pi < 0.015$ はエネルギー保有領域となっており、極端に低波数側では実験精度も若干落ちることが考えられ、また実験条件も少ないことからその領域における渦の増減が乱れ強度の増減を支配しているかどうかは現在のところ不明である。

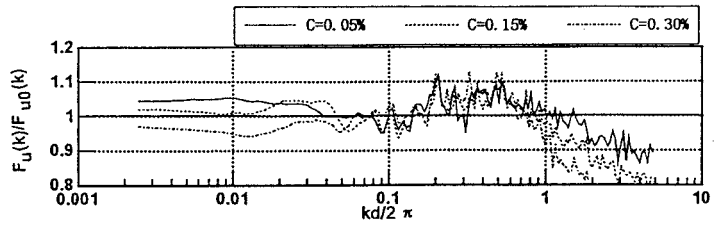


図3. $kd/2\pi$ と $F_u(k)/F_{u0}(k)$ の関係

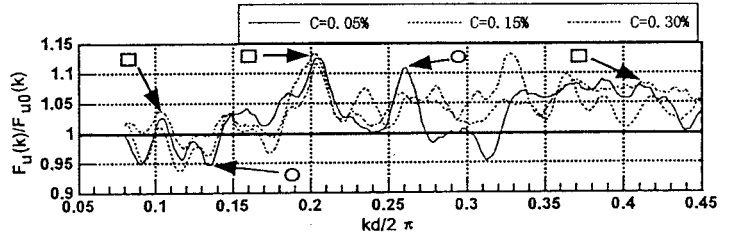


図4. $kd/2\pi$ と $F_u(k)/F_{u0}(k)$ の関係 (拡大図)

次に図 3 においてほぼ慣性小領域にあたると思われる $0.07 < kd/2\pi < 0.7$ ($2 < k < 20$) の領域に着目すると、低波数側とは異なりすべての粒子濃度においてほぼ同様な傾向を示している。この領域を詳細にみるため図 3 の $0.08 < kd/2\pi < 0.45$ の範囲を拡大したものが図 4 である。この図には幾つかの明瞭なピークがみられるが、それぞれのピークはその倍の波数において再び極大値を取っているように見える。波数空間では非線形作用による 2 倍の波数の渦の発生が考えられるため、この非線形作用によりこの図を捉えることとする。

$kd/2\pi = 0.175$ 程度を境界とし、それより小さい波数領域 ($0.08 < kd/2\pi < 0.17$) では大部分のスケールの渦は清水時に比べて減少している。その領域中の極小値ではそれぞれの 2 倍に対応する波数においておおむねエネルギー増加のピークが確認できる (例えば図中の○印)。これは $0.08 < kd/2\pi < 0.17$ の領域において、粒子の存在により非線形作用が清水時よりも強められた結果によるものと考えられる。

しかし全ての濃度で極端にエネルギーが増加している $kd/2\pi = 0.21$ では、非線形作用を考えればこのスケールの渦に変換されるはずの $1/2$ 倍の波数 ($kd/2\pi = 0.105$) のエネルギーが減少せず、逆に増加している (図中の□印)。 $kd/2\pi = 0.21$ はエネルギー減小領域の近傍に位置するピークであることから考えても、粒子の存在によってこのスケールの渦が後流として発生したために清水時に比べエネルギーが大きく増加したものと考えられる。この値ではその倍の波数 ($kd/2\pi = 0.42$) でも弱い極大値となっているが、後流として発生した渦を形成する波が純粋な正弦波でなく歪みを持った波であったとすれば、 $kd/2\pi = 0.21$ の $1/2$ および 2 倍の波数の渦の増加は説明できる。

4. まとめ

慣性小領域における中立浮遊粒子混入によるスペクトルの変形は、粒子が後流を発生させることおよび非線形作用を強めることの 2 種類の効果から生じていると考えられる。即ち粒子の存在により $kd/2\pi = 0.21$ のスケールの渦が後流として発生したために、その近傍の小さな波数帯の渦が粒子の存在により増した非線形作用から高波数の渦に変換されたものと思われる。

今後は粒子濃度、粒径による影響等を含めてより詳細な実験を行い、今回提示した考察も含めて粒子による流体の乱流構造の変化を調べていく予定である。

参考文献 1) 林ら：第 30 回水理講演会論文集, pp. 625-629, 1986.

2) R. A. Gore & C. T. Crowe : Int. J. Multiphase Flow Vol. 15, No. 2, pp. 279-285, 1989.