

中立浮遊粒子を用いた固液二相乱流に関する実験的研究

九州大学大学院 工学研究科 正会員 ○押川 英夫 フェロー 小松 利光 学生員 竹内 美礼

1. 緒言

本研究は平均せん断流の存在しない比較的単純な定常乱れである振動格子乱流場において固体粒子を中立浮遊させ、レーザー流速計の移動計測により粒子混入による乱流特性の変化を、従来殆ど調べられていなかった空間構造の面から調べたものである。波数空間の細部における微妙な差異を検出するため、とくに今回は同一条件における測定回数を大幅に増やし、データの信頼性を高めることに留意している。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた実験装置の概要を図-1に示す。水槽は長さ 200.0 cm、高さ 50.0 cm、幅 25.0 cm のアクリル製で、水槽底部から 20.0 cm 上方にメッシュサイズ 4.419 mm、棧幅 0.884 mm 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定常な乱れ場を発生させた。乱れの計測にはファイバー型レーザー流速計 (FLV) を使用し、それを水槽と独立させた自動トラバース装置に取り付け、水平方向に一定速度 22.0 cm/s で滑らかに走行させて水平方向の流速の計測を行うことにより、乱れの空間特性量を測定した。1 回の走行で得られた出力信号は、サンプリング間隔 $\Delta t = 1/1000$ 秒で AD 変換され、8192 個のデータとして収録された。

実験は水深を 45.0 cm で一定とし、鉛直方向の測定断面は格子の振動中心を $z=0$ として鉛直上向きを正とした z 座標の $z=11.5$ cm の位置とした。格子の振動数は 4.0 Hz、ストロークは 6.0 cm に固定した。格子の振動に伴う水面変動は非常に小さいことが確認されている。

浮遊粒子としては 7 種類の粒径のポリスチレン粒子を用い、中立浮遊させるために作業流体を粒子と同比重の塩水とした。比較のための粒子濃度 $C=0$ (以後、清水と呼ぶ) の実験でも極力条件を同じにするため同比重の塩水を用いている。実験は粒子濃度 $C(\%)$ が 0.005, 0.05, 0.15 の 3 種類でそれぞれ行われた。実験条件を表-1に示す。実験条件の微妙な変化が結果を大きく左右する可能性があるため、清水の実験は粒子混入前に毎回測定しており、また振動格子を長時間用いることによる水温上昇も冷却装置を用いて適宜調整している。

尚、本研究の測定結果は全て各条件毎に得られた数多くの測定結果の集合平均に基づくものであり、波数毎の議論を可能とするため波数空間に渡る移動平均は出来る限り行わないよう留意した。

3. 実験結果および考察

清水に対する水平方向の乱れの 1 次元波数スペクトル $F_{u0}(k)$ 、および各条件に対して得られた粒子混入時のスペクトル $F_u(k)$ の例として、粒径 $d=2.44$ mm の場合における結果を図-2に示す。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 $F_{u0}(k)$ において、慣性領域における $-5/3$ 乗のスペクトルが明確に現れており、精度の良い結果が得られていることが期待できる。図-2に示されているように今回の実験結果では全ての実験条件において、波数スペクトルには粒子混入によるスペクトルの概形に明確な変化は見られなかった。高波数側において微小な変化が見られるのみである。

粒子混入による乱れ構造の変化をより明確にするため、各波数の乱れの渦径を意味する $2\pi/k$ 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 $F_u(k)/F_{u0}(k)$ を縦軸にしてプロットしたものが図-3である。但しこの表示では変動が大きかったため、200回の測定である $d=0.67$ mm の場合、即ち図-3a) はフィルター幅 10、それ以外はフィルター幅 5 で三角フィルターをかけている。また極端に高波数側では図-2の高波数側 ($k \geq 20$) に見られるようにノイズの影響を受けており、少なくとも $F_{u0}(k)$ は正確な測定が出来ていないのでノイズの影響を受けていると思われる領域は cut した。

図-3から粒径 d が小さくなるにつれて、やや高波数側に大きなピーク (粒子が混入されている時のスペクトルのパワーの増加を意味する) が現れ、またこのピークは粒子濃度の増加に伴って高くなっていることがわかる。ここでこのピークの生成および粒径が大きくなるにつれてそのピークが減衰して

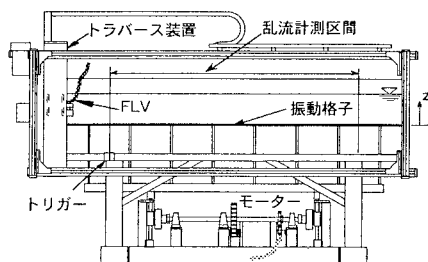
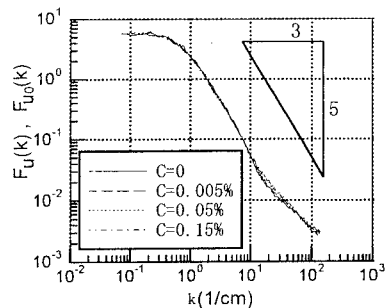


図-1 実験装置の概略

表-1 実験条件

粒径(mm)	比重	測定回数
0.41	1.06	200, 500
0.67	1.06	200
1.02	1.06	200, 500
1.55	1.05	200, 500
1.85	1.05	500
2.19	1.05	200, 500
2.44	1.05	500

図-2 波数スペクトル $F_u(k)$ ($d=2.44$ mm, 500回)

いく機構について考察する。

まずピークの生成に関してであるが、これは粒子-流体間の相間相対速度によって粒子背後に新たに発生したwakeによるものと考えられる。球背後に発生する後流に関して、坂本ら¹⁾は一樣流場に球を固定してその背後の乱れを測定することで以下の様な知見を見出している。

[1] 球背後に発生する渦のStrouhal数($S_f \equiv fd/U$)はレイノルズ数($R_e \equiv Ud/\nu$)によって若干変化するが0.2程度(0.16~0.24)であり、これは球後方に流出するwakeの交互の変動に基づいている(low modeの渦)。ここに、 f :渦の発生周波数、 U :主流の流速である。

[2] R_e が800を超えともう1種類の別の S_f が検出される(high modeの渦)が、この渦のエネルギーレベルはlow modeの渦のそれに比べかなり小さい。

ここで、図-3a), b) からこのピークの中心付近の無次元波数 $kd/2\pi$ は約0.2であることがわかる。前述の S_f を凍結乱流の仮定($k=2\pi f/U$)のもとに波数表示すると $S_f=fd/U=kd/2\pi$ となり、本研究で用いている無次元波数 $kd/2\pi$ は S_f に相当することになる。これらの点を考慮すると、 $kd/2\pi=0.2$ において発生したピークは坂本ら¹⁾によるlow modeの渦によるものと推定される。但し我々の実験では high modeの渦は検出されなかった。これは我々の実験が $R_e \leq 800$ に相当していた、或るいは坂本ら¹⁾が述べているようにhigh modeの渦のエネルギーレベルが低いために、二相流における我々の実験では検出しきれなかった等の理由が考えられる。

次に粒径の増加に伴うピークの減衰、および粒子濃度の増加に伴うピークの高さの増加について考察する。これはレーザー流速計が移動計測の際に計測する粒子近傍のwake領域の測定頻度に起因しているものと考えられる。粒子濃度が同じでも粒径が小さい図-3a), b)の場合には、粒径が大きい場合と比較して渦の発生周期は短く粒子数は多くなるため、発生直後のwake領域をレーザーが測定する頻度が増えることになり、スペクトルに大きなピークが生じるものと思われる。逆に同濃度で粒径が大きい場合粒子数は少なくなり、渦の発生周期は長くなるためにレーザーが移動中に測定するのは、大部分が発生時のwakeから減衰(カスケード・ダウンによるエネルギーの高波数側への移行やエネルギー散逸による)した後の流体部分となることから、図-3d)にはピークが明確に現れなかったものと考えられる。同一粒径では粒子濃度が高い程レーザーが粒子近傍のwake領域を捕らえる頻度が高くなるので、 $kd/2\pi=0.2$ 付近のピークが高くなる。

4. 結論

乱れ場として平均せん断流のない単純な定常乱流場である振動格子乱流場を採用し、FLVの移動計測に基づいて中立浮遊粒子混入による乱流変調の内部空間構造を調べた。今回の実験条件下において得られた知見を要約すると以下のようなになる。

(1) 中立浮遊粒子混入による乱れのスペクトルの変化はそれ程大きくはなく、通常見かける両対数表示のスペクトルの図ではそれ程変化は見られない。

(2) 中立浮遊粒子を混入した二相流においても、一樣流中に固定した球の後流のStrouhal数に対応した $kd/2\pi=0.2$ 付近の波数において、相間相対速度により生じるwakeによる乱れのproductionが存在し、そのためスペクトルにピークができる。とくに同濃度では粒径が小さい場合、渦の発生周期は短くなり粒子の数は多くなるため、その波数付近におけるスペクトルのパワーの増加が実験的に検出され易くなる。

参考文献 1) 坂本弘志, 羽二生博之, 中村知己: 一樣流中にある球から放出される渦に関する実験的研究,

日本機械学会論文集 (B編), 55巻, 515号, pp.1889-1895, 1989.

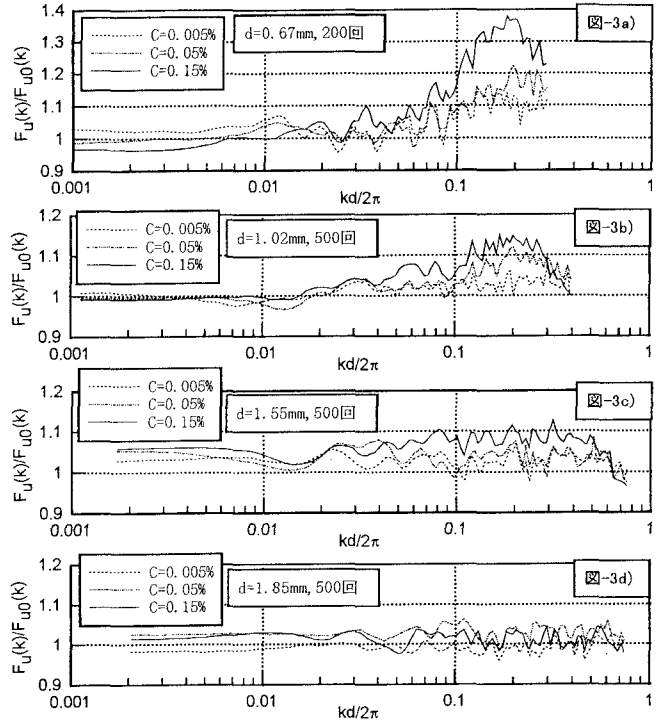


図-3 正規化された波数スペクトル $F_u(k)/F_{u0}(k)$