

混相往復水流の乱流特性に関する実験的研究
Experimental Study on the Characteristics of Turbulent Oscillatory Flow
Having Suspension of Neutrally Buoyant Particles

中央大学理工学部 大橋 正和 Masakazu OHASHI
中央大学理工学部 林 泰造 Taizo HAYASHI
中央大学大学院 ○村上 真人 Makoto MURAKAMI

The effect of suspension of nearly neutrally buoyant particles on the turbulent characteristics in oscillatory flow has been studied experimentally. Vertical distribution of concentration of particles at various phases of a cycle of oscillation was measured by means of image-processing by the use of a laser slit-beam. It has been shown that although the turbulent structure becomes more complicated by the inclusion of particles, essential part of turbulent characteristics of oscillatory flow is maintained.

Keywords : solid-liquid polyphase flow, oscillatory flow, turbulent structure, suspended particle concentration, image-processing

1. はじめに

自然界に存在する水流の現象の中には何らかの形で周期的な非定常性を有しているものが数多く認められる。主流速が一定値の周りに周期的に変動する流れは管や圧力水路の中のU字管振動、海における波や潮汐による水の運動等にみられる。これらの交番往復乱流境界層の実験的研究は Jonsson(1963)以来数多く行われており、それらの研究の Review は林・大橋(1981)、日野・柏柳・中山・原(1983)等の中になんり詳しく記されている。これらの研究により、その乱流構造は詳細に研究され、その乱流特性は実験面からもしだいに明らかにされてきている。従来のこれらの実験的研究は、Jonsson、Anwar・Atkins、Jensen・Sunner・Fredsoeおよび林・大橋の研究を除いては、いずれも風洞を使って行われたものである。一方、移動床流れ等の様に浮遊粒子を含む一方向流れは同じく自然界では数多く見られるとともに乱流構造の実験的理論的研究は従来より活発に行われてきている。

風洞を使わずに Jonsson、林・大橋の様に Water tunnel を使用して実験を行う場合の1つの利点は、往復流における固液混相の乱れ特性に及ぼす影響の研究ができるという点である。この利点を生かして本研究では、林・大橋(1981)の研究(以後“前報”と記す)において使用した大型 Water tunnel を用いて、流体より比重が0.03だけ重いポリスチレン粒子を含む交番往復流において、固液混相が乱れ特性におよぼす影響および粒子運動の乱れ特性について実験的に研究を行った。

2. 実験方法とデータ処理

実験装置は、Lundgren-Sørensen型往復流実験装置(図-1)で全長17.5m、測定部断面幅75cm、高さ24cmであり、管路底面には平均粒径0.17mmの標準砂が一様にはり付けてある。U字管をなす2つのライザーのうち図左側のものの頂部は閉じ空気が封じ込められている。この気圧をストローク・周期可変のピストンの往復運動により周期的に変化させこれにより定常的な往復流を発生させた。混入した浮遊粒子は平均粒径 0.66mm、比重 1.03のポリスチレン製の球形粒子である。

流速測定は、混入粒子の接触による破損が最も少ないと思われるコニカル型ホットフィルム流速計(TSI社製)を用いて行った。データは、デジタルデータレコーダ(TEAC社DR-2000)によりサンプリング周波数200Hzで記録をし、FACOM VP-30(中央大学電算センター)により電算処理を行った。ホットフィルムのキャ

リブレーションは、管路中央部に設置した二方向電磁流速計の出力を用いた。その際、ホットフィルム流速計の出力を常時監視しながら行った。また位相は、電磁流速計とライザー内に設置した波高計の出力から決定した(図-2)。

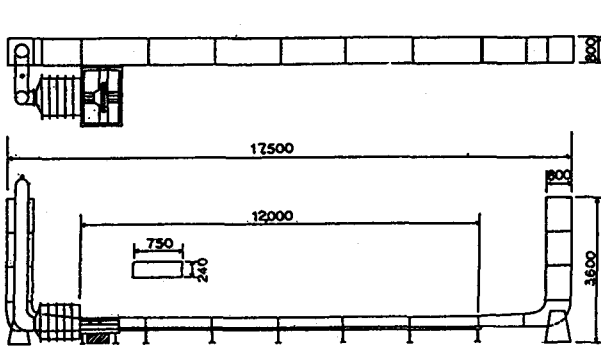


図-1 実験装置

混相流の測定の際には、混入粒子がホットフィルム流速計に及ぼす影響を考慮する必要がある。特に、粒子がホットフィルムと接触、あるいは近傍を通過する際に引き起こされるパルス状のノイズは、条件付き抽出法を用いて除去した。周期変動成分と乱れ成分の分離には、電磁流速計の出力を参考にしたアンサンブル平均に有限項で打切ったフーリエ級数(前報)をあてはめて分離した。ホットフィルム流速計による測定は、管路底面より中央部(120mm)まで14点で行った。実験条件を表-1に示す。

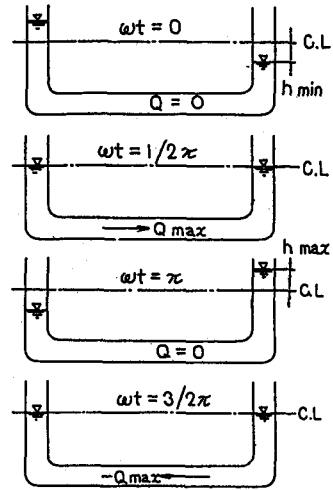


図-2 位相

	Case - 1	Case - 2	Case - 3	Case - 4
周 期 T (s)	10.61	10.20	10.47	10.41
最 大 流 速 U_B (cm/s)	58.41	63.08	59.95	55.11
角 周 波 数 ω (1/s)	0.59	0.62	0.60	0.60
主 流 振 幅 a (cm)	99.0	101.7	99.9	91.8
混 相 濃 度 (%)	0.0	0.023	0.023	0.102
Stokes層の厚さ δ (cm)	0.220	0.215 *	0.218 *	0.216 *
Stokesのパラメータ λ	449	474 *	456 *	425 *

表-1 実験条件 (* はもし清水ならばとしたときの参考値)

また、混相時の主流逆転時の粒子運動の乱れ特性を研究するために、5 Wアルゴンレーザーを光源としたレーザーライトシート法による可視化実験を行った。さらに、位相による混入粒子の濃度分布を測定するために、同じくレーザーライトシート法によりビデオ撮影したものを、パーソナルコンピュータに取り込み、映像を2値化したものから濃度を計測した。これらの可視化での位相の決定は、電磁流速計の出力をパーソナルコンピュータでA/D変換したものをビデオ画面に合成して行った。

3. 実験結果および考察

(1) 流速分布

図-3、4は流速分布(3:清水、4:混相)である。加速時(同図(a))には、 $\omega t=0$ (主流逆転時)で底面付近に清水の場合(前報)と同様の流速の先走り現象が見られ、主流流速より底面付近の流速が速くなっていることがわかる。さらに混相流の場合は、その主流速より速い部分が清水より広範囲にまで広がっている。また、減速時(同図(b))には、位相が進むにつれ一方向流の流速分布に近づいているのがわかる。混相の場合は、主流流速より速くなる部分は清水の場合よりも広範囲に亘っている。また、管路上部よりスチルカメラで撮影した写真からも、主流逆転時の底面付近での先走りと境界層外縁付近での加速が始まったばかりの粒子の複雑な運動が見ることができる。

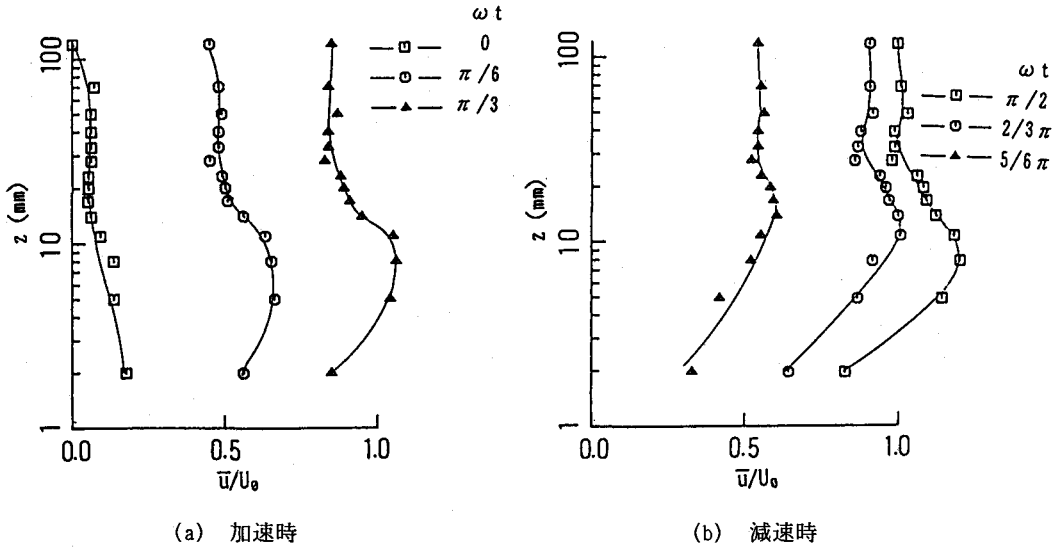


図-3 流速分布 (清水)

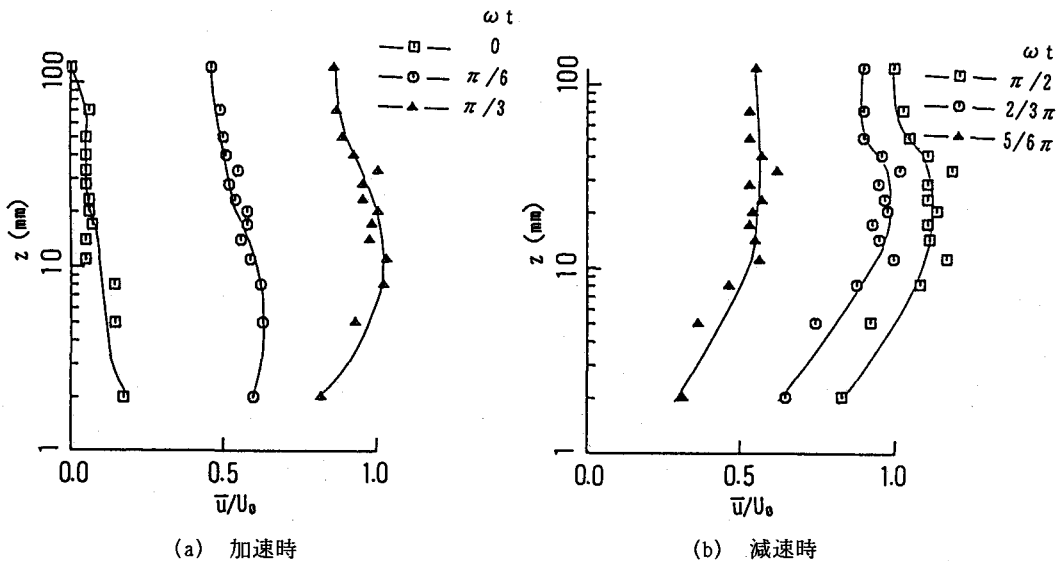


図-4 流速分布 (混相)

(2) 乱れ流速

浮遊粒子を含む水流と清水流の主流方向成分乱れ流速の実測値を位相0から π までで比較したものが図-5((a):清水、(b):混相)である。乱れは、清水、混相ともに減速時に爆発的に発生しており混相流の場合の方が減速時の幅広い位相に亘って高周波の乱れがみられ振幅の大きさも若干大きいことがわかる。

(3) 乱れの1次元スペクトル

図-6は、加速期間および減速期間の各期間における乱れの1次元スペクトル((a):清水、(b):混相)で、最大エントロピー法により求めた。この図より、スペクトルの大きさは清水、混相ともに減速時の方が加速時より大きく、また、全体的に清水より混相の方が大きくなっている。スペクトルの傾きは、清水では $-5/3$ 乗則より急な傾きを持っているが、混相では、 $-5/3$ 乗則より緩やかな傾きである。これは浮遊粒子の乱れエネルギーの減衰の速さが、流体のそれと違っているのも、高い周波数では、乱れエネルギーの減衰が遅れ、緩やかな傾きになるものと思われる。

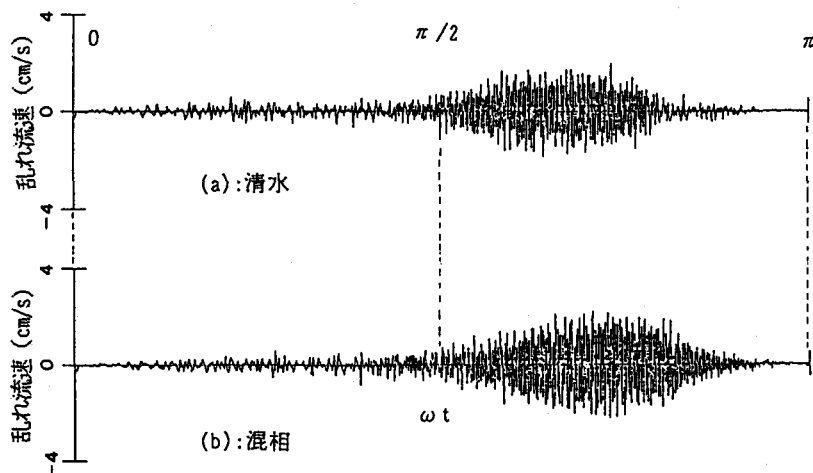
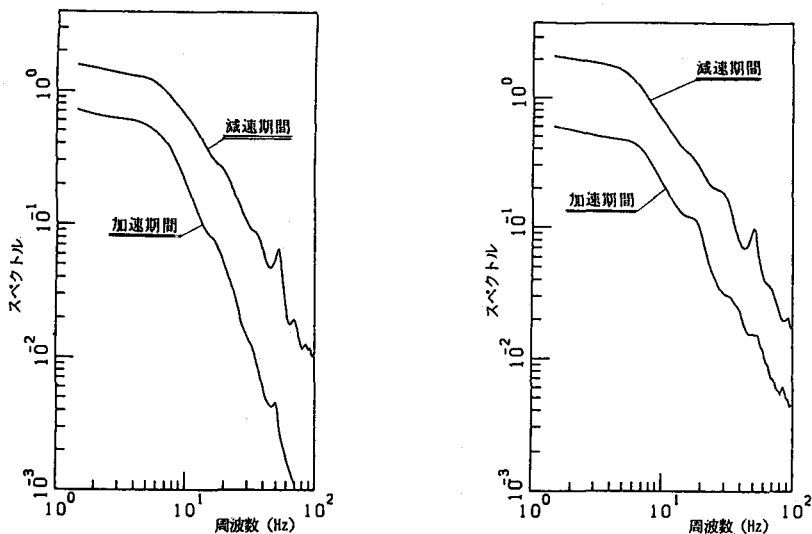


図-5 乱れ流速実測値



(a) 清水

(b) 混相

図-6 乱れの1次元スペクトル

(4) 粒子濃度分布

図-7 は底面付近の混入粒子の濃度分布で、底面から4cmの間の平均濃度との比率で表してある。主流逆転時には底面より、 $z/2D=0.07$ 付近の方が濃度は高く、 $z/2D=0.15$ 付近で低くなっている。流速が加速し始める($\omega t=\pi/3$)と、 $z/2D=0.15$ 付近の様な特に濃度の低い部分もなくなり、濃度の高い部分は底面に近づくが、まだ底面より多少上方の方が高い濃度である。そして主流が減速し始める($\omega t=2/3\pi$)と、一方向流の濃度分布によく似た分布形になっている。

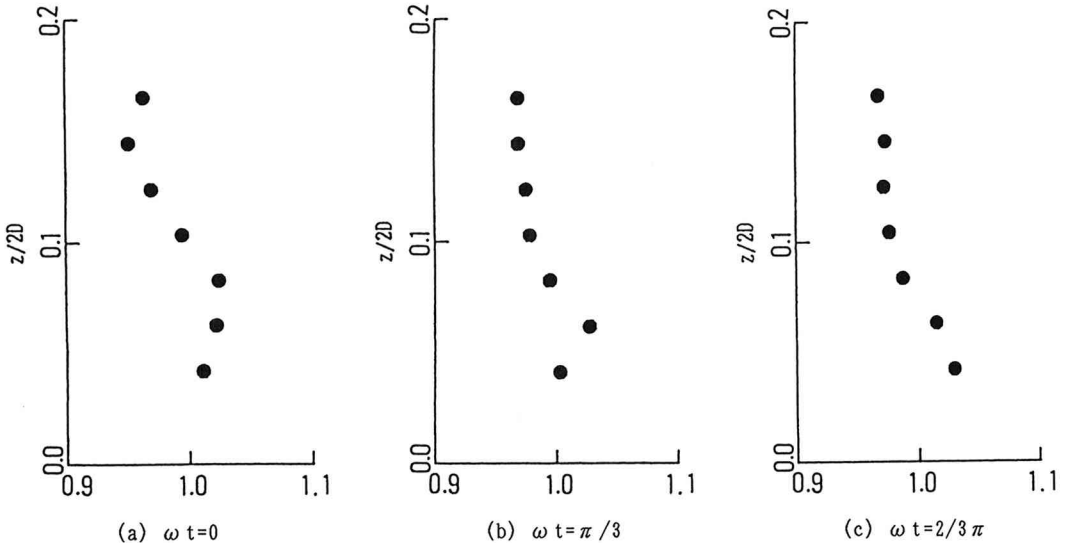


図-7 粒子濃度分布

(5) 粒子の運動特性

写真-1 は、主流逆転時における粒子の動きを可視化した写真である。底面付近(同写真(a))では逆転時に、粒子の動きは複雑で流体の運動とは必ずしも一致しておらず、慣性による位相のずれや遅れが見られ、それにより粒子の動きが乱流の組織構造に逆に影響を及ぼしていると考えられる。同写真(b)は、管路中央部付近の粒子の動きを可視化した写真で、同位相の底面付近の写真(a)に比較して粒子の動きに乱れがほとんど見られないことがわかる。

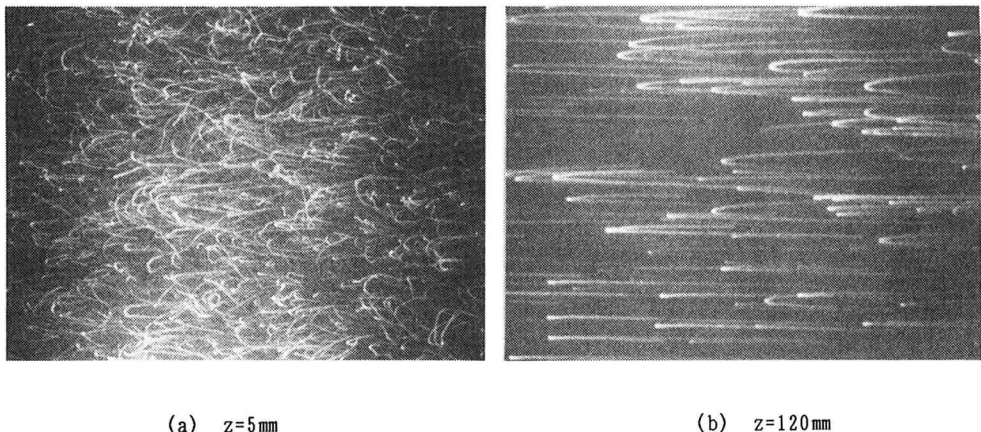
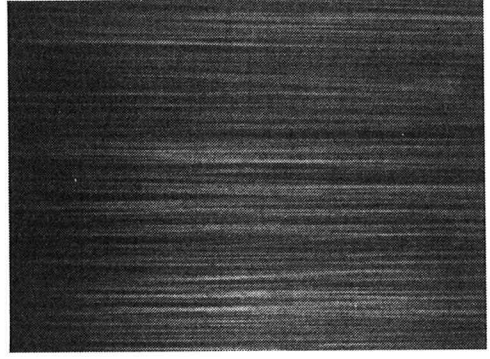


写真-1 水平断面写真 ($\omega t=0$)

写真-2 は $\omega t = \pi/2$ の瞬間(主流速最大時の瞬間)の写真である。管路中央部(同写真(b))では、やはり粒子の動きはほとんど乱れておらず平行であるが、底面付近では平行になっていない。



(a) $z=5\text{mm}$



(b) $z=120\text{mm}$

写真-2 水平断面写真 ($\omega t = \pi/2$)

4. おわりに

固液混相往復流の乱流特性、および混入粒子の乱れにおよぼす影響について実験を行った。特に、レーザライトシートを用いた可視化によって、粒子の挙動を詳しく観察することができた。粒子が混入されたことによって複雑にはなったが、往復流の乱流構造の多くが保存されていることがわかった。

謝 辞

本実験の遂行にあたっては、中央大学土木工学科学部卒研究生 富澤英克、山崎晋也の両君が熱心に協力せられた。記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) Jonsson, I. G. : Measurements in the turbulent wave boundary layer, Proc. 10th IAHR Congress, London, Vol. 1, pp. 85-92, 1963.
- 2) Anwar, H. O. and Atkins, R. : Turbulent measurements in simulated tidal flow, J. Hydraul. Am. Soc. Civ. Eng. 106, pp. 1273-1289, 1980.
- 3) Hayashi, T. and Ohashi, M. : A dynamical and visual study on the oscillatory turbulent boundary layer, "Turbulent Shear Flow 3" (Springer-Verlag), pp. 18-33, 1981.
- 4) Hino, M., Kashiwayanagi, M., Nakayama, A. and Hara, T. : Experiments on the turbulence statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow, J. Fluid Mech. 131, pp. 363-400, 1983.
- 5) Jensen, B. L., Sunner, B. M. and Fredsøe, J. : Turbulent oscillatory boundary layers at high Reynolds numbers, J. Fluid Mech. 206, pp. 265-297, 1989.