

# 矩形管内固液二相流中の乱流エネルギー輸送

## Turbulent Energy Transfer in Liquid -Solid Two-Phase Channel Flow

80122570 田中智彦(Tomohiko Tanaka) Supervisor 菱田公一(Koichi Hishida)

### 1. 緒論

これまでの分散系二相乱流に関する実験的研究<sup>1-3)</sup>及び直接数値計算を用いた研究<sup>4,5)</sup>により、二相乱流における現象解明がなされてきたが、固体粒子群在により変調するエネルギーカスケードの詳細なメカニズムは未解明である。本研究では、分散系固液二相流において各波数領域間でのエネルギー輸送を調べるために、粒子画像流速計(PIV)により得られた矩形管内の固液二相流速度場にフィルタリング操作<sup>6,7)</sup>を施した。フィルタリング操作はLES(Large Eddy Simulation)において用いられ、スケールを分離することができるとともに分離された両スケール間のエネルギー流束の算出が可能となる。特に、鉛直矩形管内乱流中の大規模渦小規模渦間のエネルギー輸送を明らかにし、波数空間でのエネルギー収支を評価する事で、流体が粒子群によりエネルギー供給を受けるスケールを特定する。

### 2. 実験条件及び計測方法<sup>2)</sup>

本研究では鉛直チャンネルを用い、連続相流体に水を用いた。流路特性を表1に示した。ガラス粒子はコルモゴロフスケールよりの大きなものを選んだ。粒子特性を表2に示す。両相の速度は粒子画像流速計(PIV)により計測を行った。図1にPIVの概要を示す。図1はX-Y平面計測時の概要図でカメラとレーザー位置を取り替える事で、X-Z平面の計測も行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 流れ場の統計諸量

図2に平均流速と流れ方向乱流強度を示す。粒子体積分率の増加に伴い、平均流速及び乱流強度は増加が観察される。また、空間FFTを用いて流れ方向乱流エネルギースペクトルを算出した。図3に示す。横軸はコルモゴロフスケールで無次元化した。粒子体積分率の増加とともにエネルギースペクトルも増加し、特に、粒子径程度の高波数スケールでの増加が顕著であった。

#### 3.2 PIV速度データのフィルタ操作

PIVにより得られた速度データにフィルタ操作を施す事で、大規模渦と小規模渦との運動量交換を表すSub-Grid Scale Stress(SGS応力)を算出した。粒子在時の瞬時SGS応力分布を図4に示す。なおSGS応力 $t_{ij}$ は以下の式で定義される。

$$t_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (1)$$

SGS応力には、粒子周囲に強い値を持つものの、粒子毎にその正負は異なる。歪度や渦度のような単一粒子による明確な指向性は見受けられない。SGS応力は、大規模渦との小規模渦の運動量交換を示す諸量であり、粒子周囲のSGS応力に関しては、粒子の持つ運動量が流体に交換されることを示す。SGS応力の正負は、単一粒子の周囲粒度構造よりも粒子移動方向との大規模渦の位置関係に依存する。また、粒子影響の規模は粒径の数倍程度で、SGS応力モデルには粒子運動量をこのスケールで分配できるモデルが求められる。

#### 3.3 フィルタ操作による乱流エネルギーの輸送

##### 3.3.1 波数空間のエネルギー流束 Large Eddy Simulation

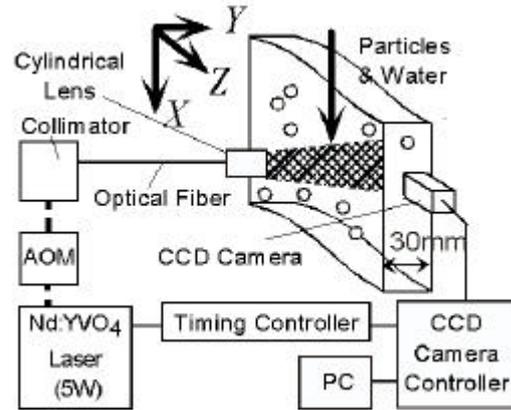


Fig. 1. Schematic of particle image velocimetry and vertical water channel.

Table 1. Fluid flow parameters.

channel width	$h$	[mm]	30
centerline mean velocity	$\langle U_c \rangle$	[mm/s]	158
channel Reynolds number	$Re_h$		5,740
Kolmogorov micro scale†	$\lambda$	[mm]	252

Table 2. Particle properties.

Properties	glass		
number mean diameter	$d_p$	[mm]	396.4
density	$\rho_p$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2,590
particle Reynolds number‡	$Re_p$		50.0
particle volumetric fraction	$f$		$1.8 \times 10^{-4}$ $3.3 \times 10^{-4}$

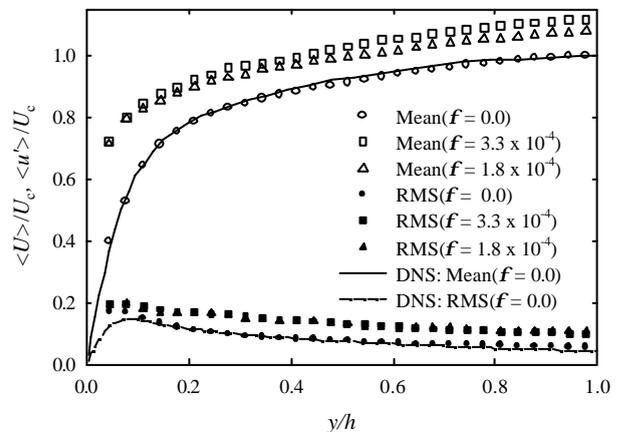


Fig. 2. Profiles of mean streamwise velocity of water in the presence of particles.

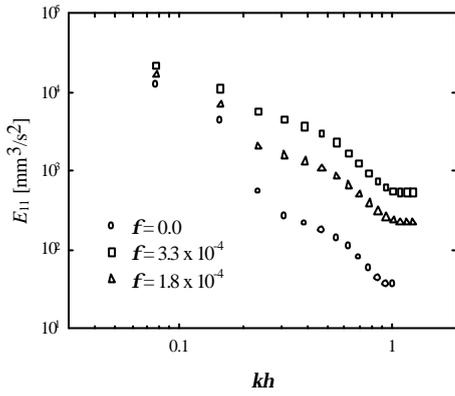


Fig. 3. Profiles of turbulent intensity of water in the presence of particles.

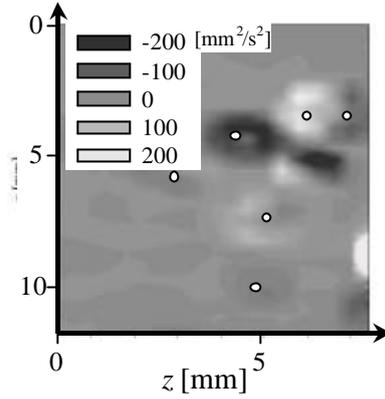


Fig. 4 Contour plot of subgrid scale,  $P$ , (top-hat filter of width  $D=0.8\text{mm}$ )

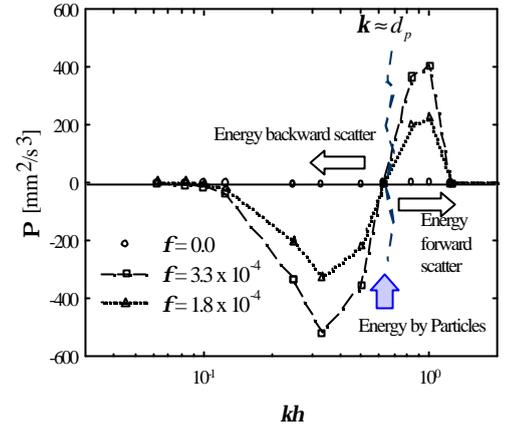


Fig. 5 Profiles of energy Flux  $P$  in the presence of particles as function of filter size frequency  $k$

(LES)におけるフィルタ操作を実流動場に用いることで、フィルタ以上のスケールの大規模渦から、それ以下の小規模渦へのエネルギー流束を求める。ここで、エネルギー流束は以下の式で与えられる<sup>(6,7)</sup>。

$$P_{ij} = -t_{ij} \tilde{S}_{ij} \quad (2)$$

$\tilde{S}_{ij}$  はグリッドスケールにおけるひずみ度である。波数空間におけるエネルギー流束を評価した。フィルタ操作にスペクトルカットオフフィルタを用い、フィルタ幅を変化させることでエネルギー流束  $P(k)$  を波数  $k$  の関数として表した。図5に示す。粒径程度のスケールにおいて、エネルギー流束の符号は逆転している。これはこのスケールにおいて、流体が粒子運動エネルギーを乱流エネルギーとして受け取り、それを近傍のスケールに再分配している事を示す。つまり、粒径以下のスケールではエネルギーカスケードは促進され、それ以上のスケールでは、エネルギー逆輸送が生じていることが判る。

**3.3.2 波数空間のエネルギー収支** 波数間のエネルギー輸送の詳細を知るために、各周波数におけるエネルギー収支を調べた。概念図を図6に示す。波数  $k$  におけるエネルギー散逸量を  $D(k)$ 、粒子による付加エネルギー項を  $Ext_p(k)$  と定義し、波数  $k$  及び  $k+dk$  での二つのフィルタにより区切られる微小波数領域でのエネルギー輸送を以下のように評価した。

$$Ext_p(k)dk - D(k)dk = \Pi(k+dk) - \Pi(k) \quad (3)$$

ここで  $e_{SGS}(k)$  は  $k$  以下のスケールでの総エネルギー散逸である。また、 $D(k)$ 、 $Ext_p(k)$  は以下のように記述することができる。

$$e_{SGS} = n \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

$$D(k) = -\frac{\partial e_{SGS}(k)}{\partial k} \quad (5)$$

$$Ext_p(k) = \frac{\partial \Pi(k)}{\partial k} + D(k) \quad (6)$$

図7に粒子による付加エネルギー項を示した。粒径程度のスケールに粒子から多くのエネルギーが供給されている事がわかる。なお、高体積分率の場合、コルモゴロフスケールの10倍以上の比較的的低波数領域においても、粒子による付加エネルギーは顕著である。これは高体積分率条件下で粒子間距離が減少するため、複数粒子により、新たな大規模渦を誘引しているため<sup>3)</sup>であると推察される。

#### 4. 結言

鉛直矩形内固液二相乱流を対象としたPIV計測より得られた流動場にフィルタ操作を行う事で以下の知見を得た。

(1) SGS応力には、粒子周囲に強い値を持つものの、単一粒子による明確な指向性は見受けられない。粒子影響の規模は

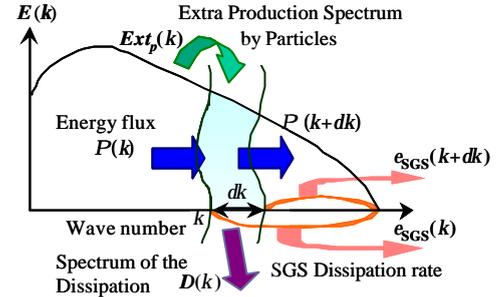


Fig. 6 Schematic of spectral energy transfer at a unit wavenumber.

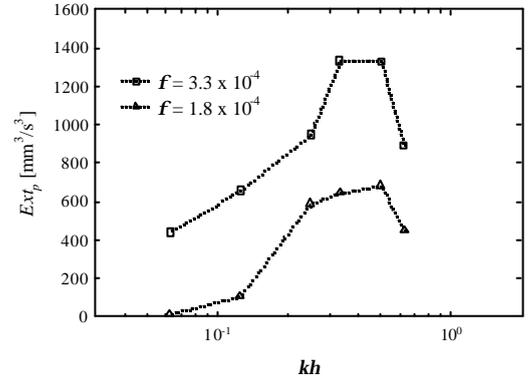


Fig. 7 Profiles of energy transfer by particles per frequency  $Ext_p(k)$  in the presence of particles as function of filter size frequency  $k$ .

粒径の数倍程度で、SGS応力モデルには粒子運動量をこのスケールで分配できるモデルが求められる。

(2) フィルタ操作による波数空間でのエネルギー収支を調べる事で、粒子が流体にエネルギーを供給する支配的なスケール(粒径程度)を特定した。

#### 参考文献

- 1) Kulick, J.D., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, **277** (1994), 109.
- 2) 菱田・ほか4名, *機論*, **62**-593, B(1996), 26.
- 3) 佐藤・ほか2名, *機論*, **66**-642, B(2000), 415.
- 4) Elghobashi, S.E., and Truesdell, G.C., *Physics of Fluids A*, **5** (1993), 1790.
- 5) Squires, K.D., and Eaton, J.K., *Physics of Fluids A*, **2** (1990), 1191.
- 6) Liu, S., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, **275** (1994), 83.
- 7) Liu, S., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, **387** (1999), 281