

# 高速 PTV を用いた上昇及び下降気泡乱流中の エネルギーカスケード機構の解明

## Investigation of Energy Cascade Mechanisms in Upward/Downward Bubbly Flows by Using High Speed PTV

80816630 中川雅志 (Masashi Nakagawa) Supervisor: 菱田公一 (Koichi Hishida)

### 1. 緒言

気相と液相の混在した気液二相流は発電所の冷却系統や化学プラントの反応槽等で見受けられ、これらの産業機器の安全性の向上、高効率化のためには、気液二相流の流動構造の正確な把握が必要である。しかし、気液二相流の流動構造は、液相・気泡それぞれの挙動の複雑さに加え、流体-気泡間の運動量交換といった複雑な要素が含まれるため、詳細なメカニズムについて更なる知見が望まれる。

本研究では、鉛直円管内を流れる気液二相流を対象とし、特に流れ方向と重力方向の違いによる気液二相乱流構造の相違を調べるため、上昇流、下降流それぞれの気泡介在による乱流構造変化の詳細を実験的に明らかにする。直径 44 mm の円管内を液相バルク速度 380 mm/s で流れる気泡流 ( $Re = 19,000$ ) を実験対象とし、レーザ誘起蛍光法 (LIF) を併用した高速度時系列 Particle Tracking Velocimetry (PTV) 及び Shape Projection Imaging (SPI) を適用して、液相流速及び気泡の位置、形状を同時計測した。さらに、計測した速度場に LES で用いられているフィルタリング操作を適用することで、各スケールでのエネルギー輸送機構を定量的に評価した。

### 2. 実験装置及び実験条件

図 1 に計測装置概略図を記す。液相の計測には高時間・高空間分解能 PTV を、気泡の形状及び位置の計測には SPI をそれぞれ適用した。PTV の光源には YLF レーザ ( $\lambda = 527 \text{ nm}$ )、SPI の光源には青色 LED ( $\lambda = 473 \text{ nm}$ ) を用いた。座標系は流れ方向を  $z$  軸、半径方向を  $r$  軸としている。気泡の位置及び形状が液相乱流構造に及ぼす影響を調べるため、タイミングハブによって 2 台のカメラおよびレーザを同期させ、同時計測を行った。

表 1 に本実験条件を示す。バルク速度 380 mm/s を代表速度、パイプの内径 44mm を代表長さとしたレイノルズ数  $Re_{2R}$  はおよそ 20,000、コルモゴロフ長さスケールは 220  $\mu\text{m}$  である。ボイド率  $\alpha$  [%] は上昇流の場合は 0.5, 1.0, 1.5, 下降流の場合は 0.5, 0.75, 1.0 とし、単相も含めると両流動条件とも 4 条件ずつ、さらに気泡径の影響を調べるために径を変えた実験を 2 条件 (大径気泡群, 小径気泡群), 各ボイド率にて行った。気泡径は界面活性剤として 3-pentanol ( $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$ ) を加えることで変化させた。

### 3. 実験結果及び考察

図 2 に局所ボイド率分布を示す。(a)は上昇流、(b)は下降流時の結果をそれぞれ示しており、横軸は流路半径  $R$  で無次元化している。図 2 より、気泡は上昇流においては壁面近傍に、下降流においては流路中央に集中する傾向が見られる。この結果は Wang らの結果<sup>[1]</sup>と良好な一致を示す。

図 3 にエネルギースペクトルの結果を示す。エネルギースペクト

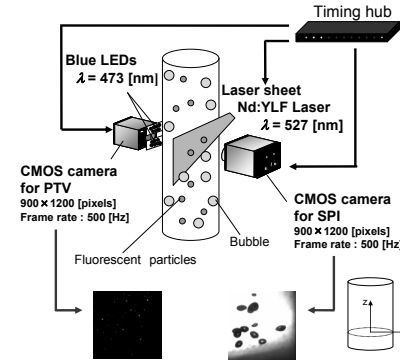


Fig. 1 Schematic of experimental facility.

Table 1 Experimental condition.

Pipe diameter	$2R$ [mm]	44
Bulk velocity	$U_b$ [mm/s]	380
Pipe Reynolds number	$Re_{2R}$ [-]	19000
Kolmogorov length scale <sup>†</sup>	$\eta$ [ $\mu\text{m}$ ]	220

<sup>†</sup>: values at the centerline of the pipe

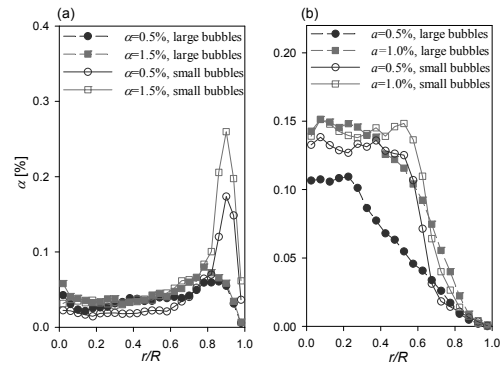


Fig. 2 Local void fraction profiles of (a) upward flow and (b) downward flow.

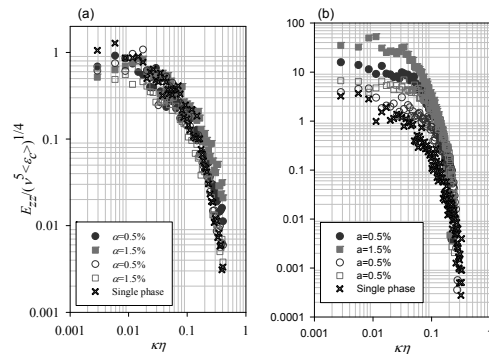


Fig. 3 Turbulence kinetic energy spectra profiles of (a) upward flow and (b) downward flow.

ルは式(1)に Foucaut らのノイズ低減法<sup>3)</sup>を用いて算出した。

$$E_{kk}(\kappa) = \int_0^{T \langle U_z \rangle} |u_k \zeta e^{-ik\zeta}|^2 d\zeta, \quad \zeta \equiv t \langle U_z \rangle \quad (1)$$

(a)は上昇流、(b)は下降流時の結果をそれぞれ示しており、縦軸は水の動粘性係数 $\nu$ 及び単相時流路中央における平均エネルギー散逸率 $\langle \varepsilon \rangle$ で、横軸は波数 $\kappa$ を $2\pi/z$ と定義し、コルモゴロフ長さスケール $\eta$ により無次元化している。気泡の影響を調べるため、上昇流は壁面近傍 ( $r/R=0.9$ )、下降流は流路中央 ( $r/R=0.0$ ) での値を示している。上昇流では高波数域で気泡後流によるエネルギースペクトルの増加が見られる一方で、低波数域で大規模渦の崩壊によるエネルギーの減少が見られる。下降流では低波数域でエネルギーの増加が見られるが、これは気泡がクラスタ化しやすく、気泡径以上の乱れを誘起しやすいためである。エネルギースペクトルの変化は乱流運動エネルギーカスケードの変調を示しており、上昇流と下降流でエネルギースペクトル変化の傾向が異なることから、エネルギーカスケード変調のメカニズムも異なっていることがこの結果より示唆される。

図4に大径気泡混入時の瞬時の乱流エネルギー散逸率を示す。(a)は上昇流、(b)は下降流時の結果をそれぞれ示しており、縦軸、横軸共に流路半径 $R$ で無次元化している。白い丸は気泡の位置を表している。散逸率は以下の式に田中らが提案した誤差低減法<sup>3)</sup>を適用して算出した。

$$\varepsilon \approx \nu \left\{ 2 \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} \right)^2 + 2 \frac{\partial u_z}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial z} \right\} \quad (2)$$

上昇流、下降流共にエネルギー散逸率の高い領域は局所ボイド率の高い領域と重なっており、気泡の介在が局所的な乱流エネルギー散逸を誘起する事が分かる。また、下降流は上昇流と比べて流路全域で強い乱流散逸が起きているが、これは気泡-液相の相対速度が大きい事及び局所ボイド率が高い事に起因する。

乱流中には様々な長さスケールの流動構造があり(図5左)、大スケール運動は乱流エネルギー生成、小スケール運動は乱流エネルギー散逸を起こしている。各スケールが運動エネルギーに寄与する役割が異なるため、流動構造を考える上でスケール毎の解析は重要である。今まで示した結果より、上昇流と下降流では、気泡が乱流エネルギー変調を起こすスケール域が異なることが示唆された。そこで、シミュレーションで用いられているフィルタリングを用いた解析法を実速度場に適用することで、各スケールにおける乱流構造変化の定量的な評価を試みる。このフィルタリング法を用いることで、乱流場中に存在する様々なスケール運動の内、フィルタ幅以上の運動のみを抽出することができる(図5右)。この手法を応用することで、気泡が周囲乱流に輸送するエネルギー量をスケール毎に評価できる。

図6にスケール解析によって得た結果をまとめた。単相流ではエネルギー生成と散逸は釣り合っている。上昇流では気泡の介在によって大規模渦によるエネルギー生成項は減少し、一方で乱流エネルギー散逸は増加する。そこで、その差分を補間するように、中規模スケールにおいて気泡によるエネルギー付加が起る。下降流においても上昇流と同様に、生成項の減少、散逸項の増加とそれに伴う気泡からのエネルギー輸送が行われるが、周囲流体から気泡へのエネルギー輸送も同時に起こっており、気泡によるエネルギー付加の値は上昇流と比べて大きい。

## 5. 結論

本研究は、流れ方向と重力方向の違いによる気液二相乱流構造の相違を調べるため、鉛直円管内を上昇、下降する気液二相

流を対象に、高時間・空間分解能 PTV と SPI を組み合わせた計測を行った。以下に得られた知見を記す。

- ・ 上昇流と下降流ではボイド率分布が異なるため、流路内の局所乱流エネルギー散逸率分布が異なることが示された。
- ・ 上昇流と下降流では相対速度や局所ボイド率分布が異なるため、気泡によるエネルギースペクトル変調が異なり、各スケールにおける気泡-液相間のエネルギー輸送メカニズムも異なることが示された。

以上の結果は、上昇流と下降流では気泡に誘起されるエネルギーカスケード変調のメカニズムが異なることを示している。

## 参考文献

- [1] Wang et al., *Int. J. Multiphase Flow*, **13**(3), (1987).
- [2] Foucaut et al., *Meas. Sci. Technol.*, **15**, (2004).
- [3] Tanaka, T. and Eaton, J.K., *Exp. Fluids*, **42**(6), (2007).

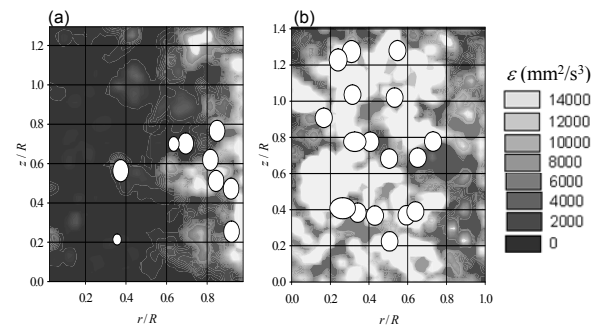


Fig. 4 Instantaneous energy dissipation profiles of (a) upward flow and (b) downward flow.

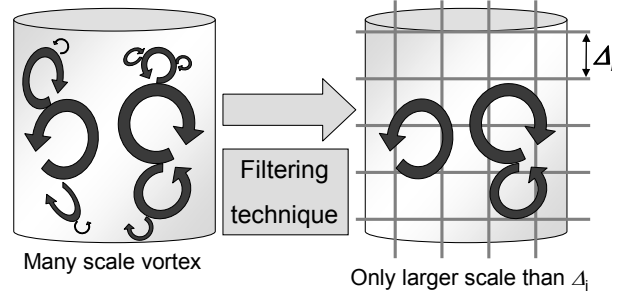


Fig. 5 Concept of filtering technique.

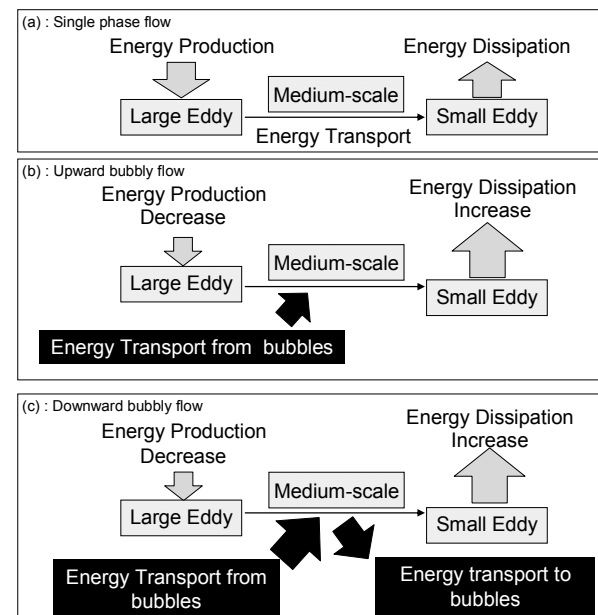


Fig. 6 Results of scaling analysis of (a) single phase flow, (b) upward bubbly flow and (c) downward bubbly flow.