

X線ラジオグラフィによる水平バンドル内 気液二相流のボイド率分布計測

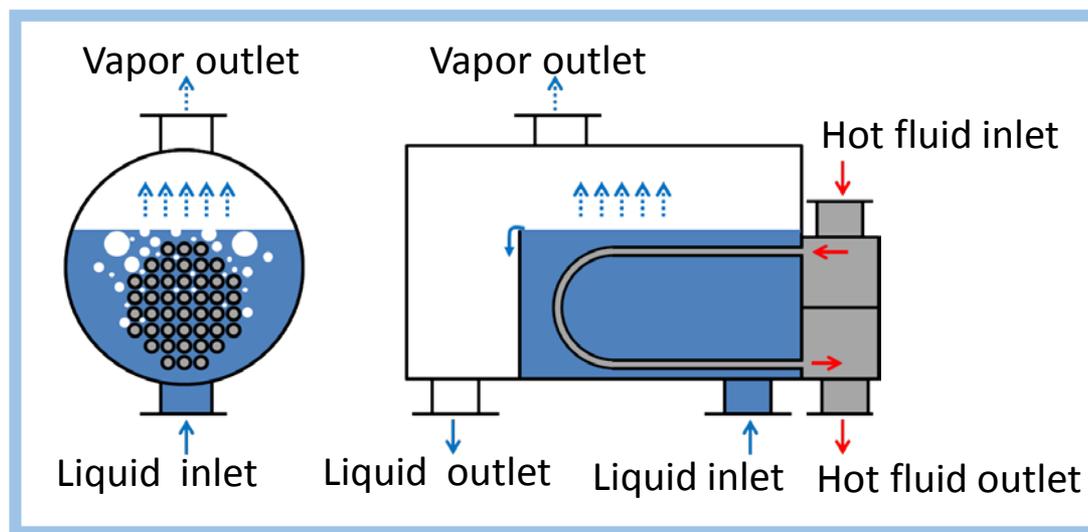
○馬場 実咲¹, 村川 英樹¹, 杉本 勝美¹, 竹中 信幸¹,
齋藤 泰司², 伊藤 大介²

¹神戸大学大学院工学研究科

²京都大学原子炉実験所

シェルアンドチューブ型熱交換器：

プロセス工業，化学工業，原子力発電所などで一般的に利用されている



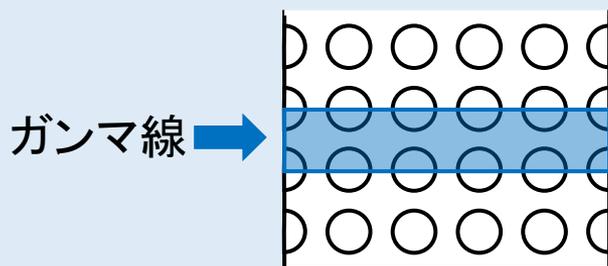
多管式熱交換器の最適設計

- 管周りのボイド率と流動様式の関係
- 管の伝熱特性

➡ ボイド率分布の評価

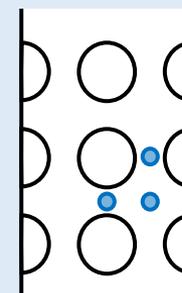
従来の研究

空間平均ボイド率の評価



Dowlati, R et al., *AIChE Journal*, Vol.36, No.5 (1990), pp.765-772.

局所ボイド率の評価



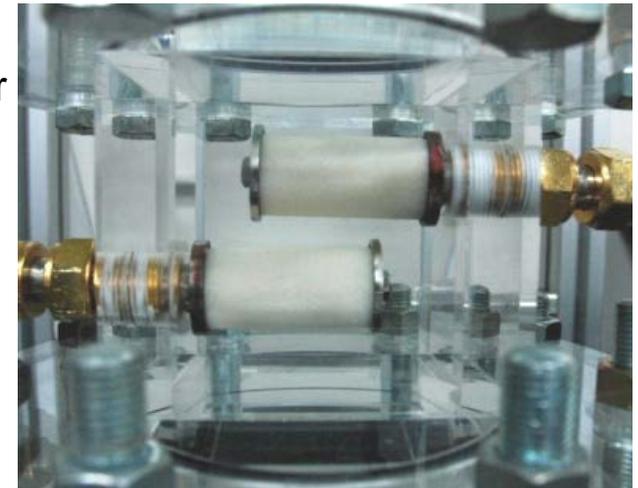
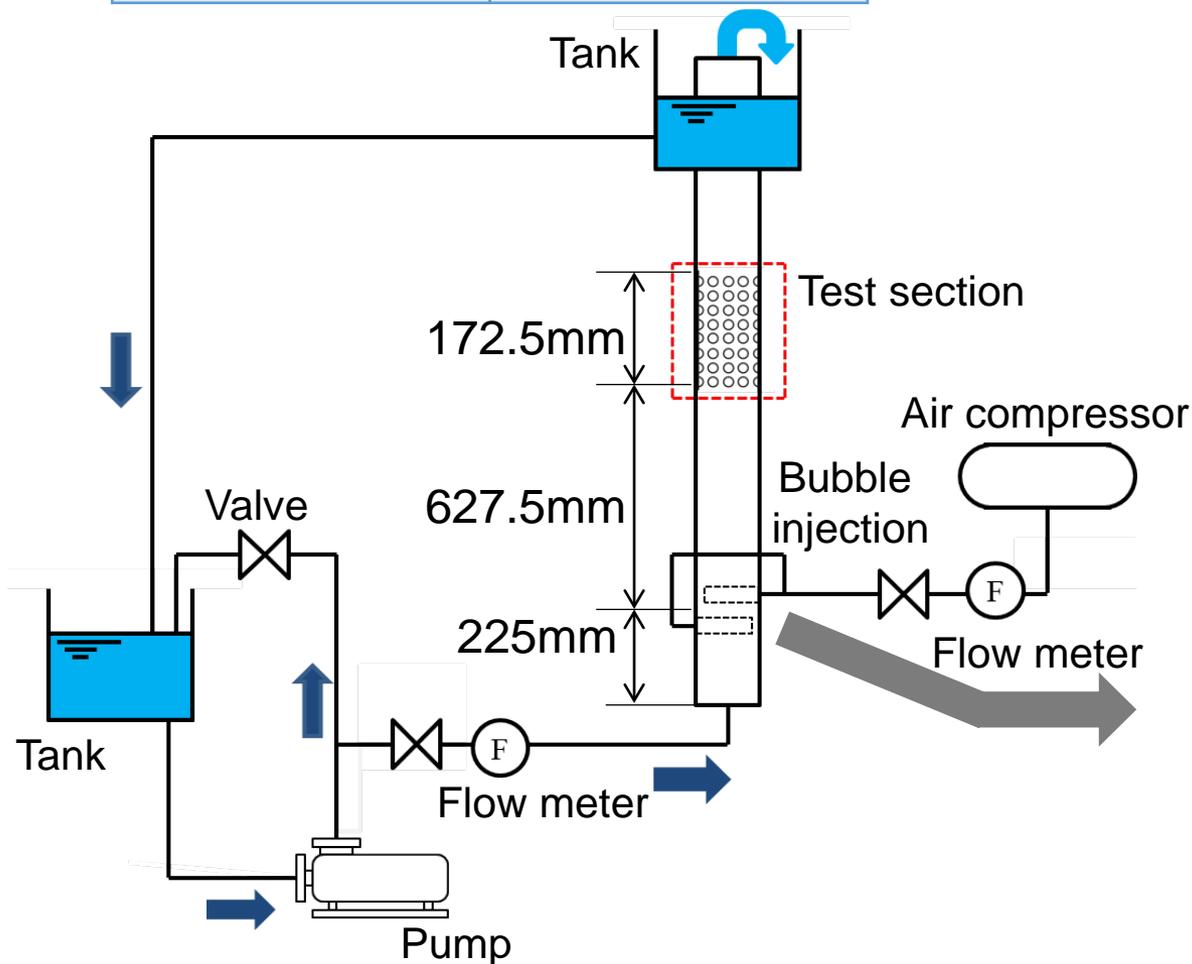
D.A., McNeil et al., *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.45, (2012), pp.53-69.

本研究の目的:

水平バンドル内気液二相流の管周りボイド率分布が流動様式に与える影響を評価する

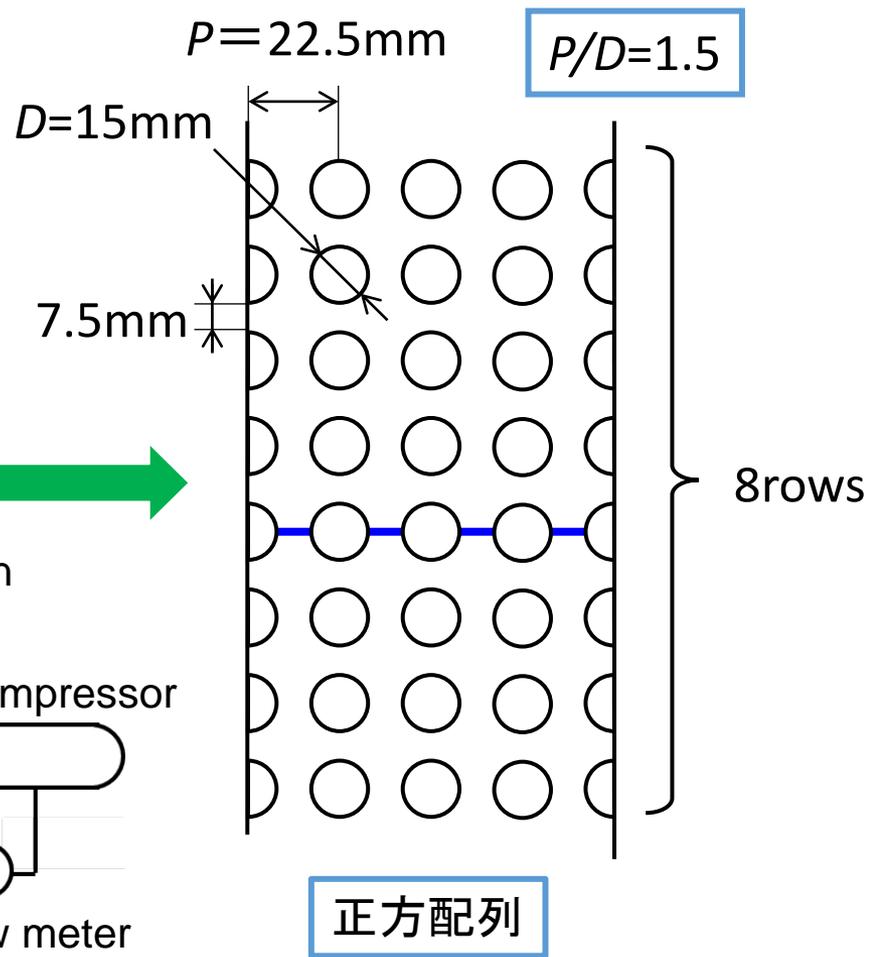
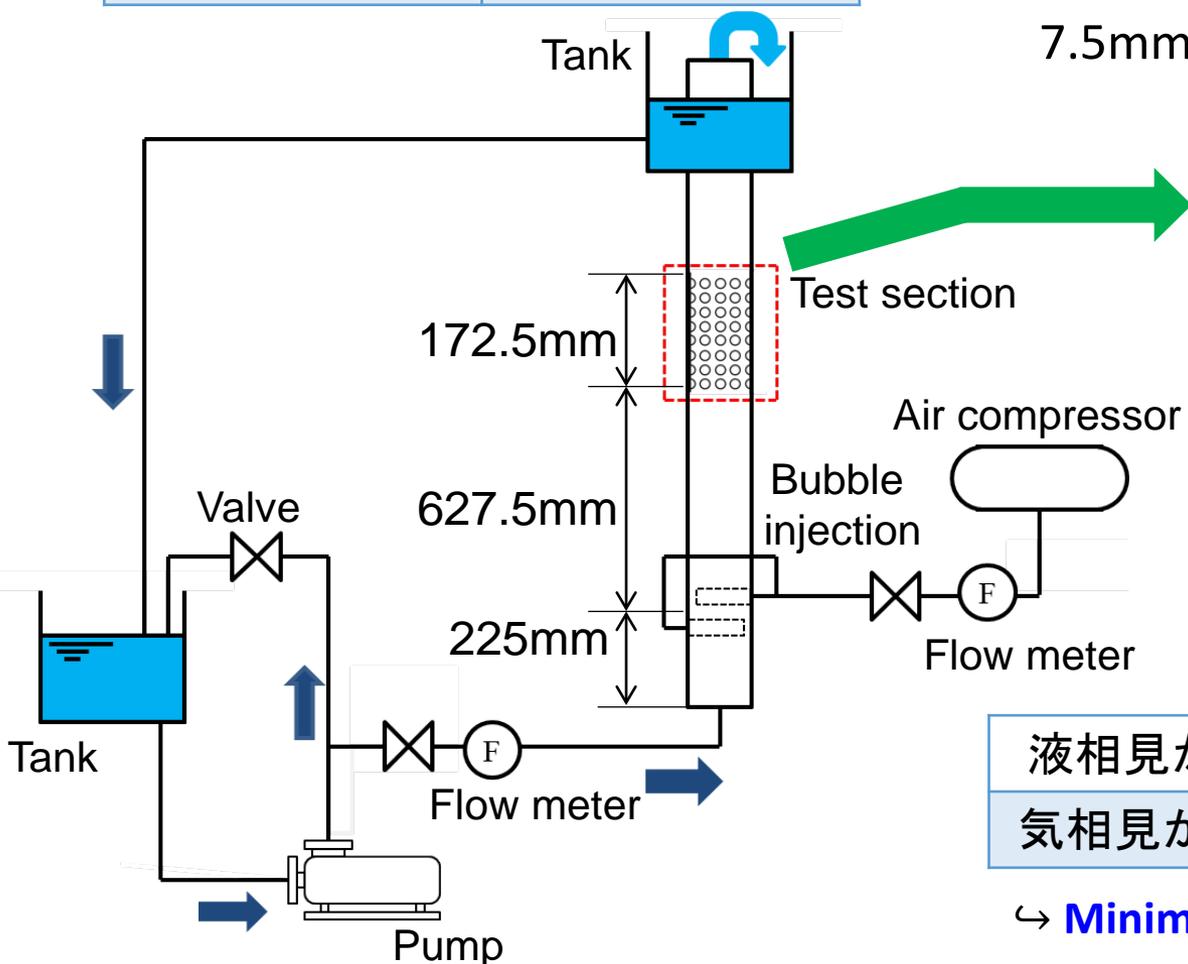
- X線ラジオグラフィ
- 非接触計測法
 - ビーム方向の空間平均ボイド率が得られる

作動流体	空気-水
圧力	大気圧下
水温	20~25°C
流路断面	90 × 90 mm ²



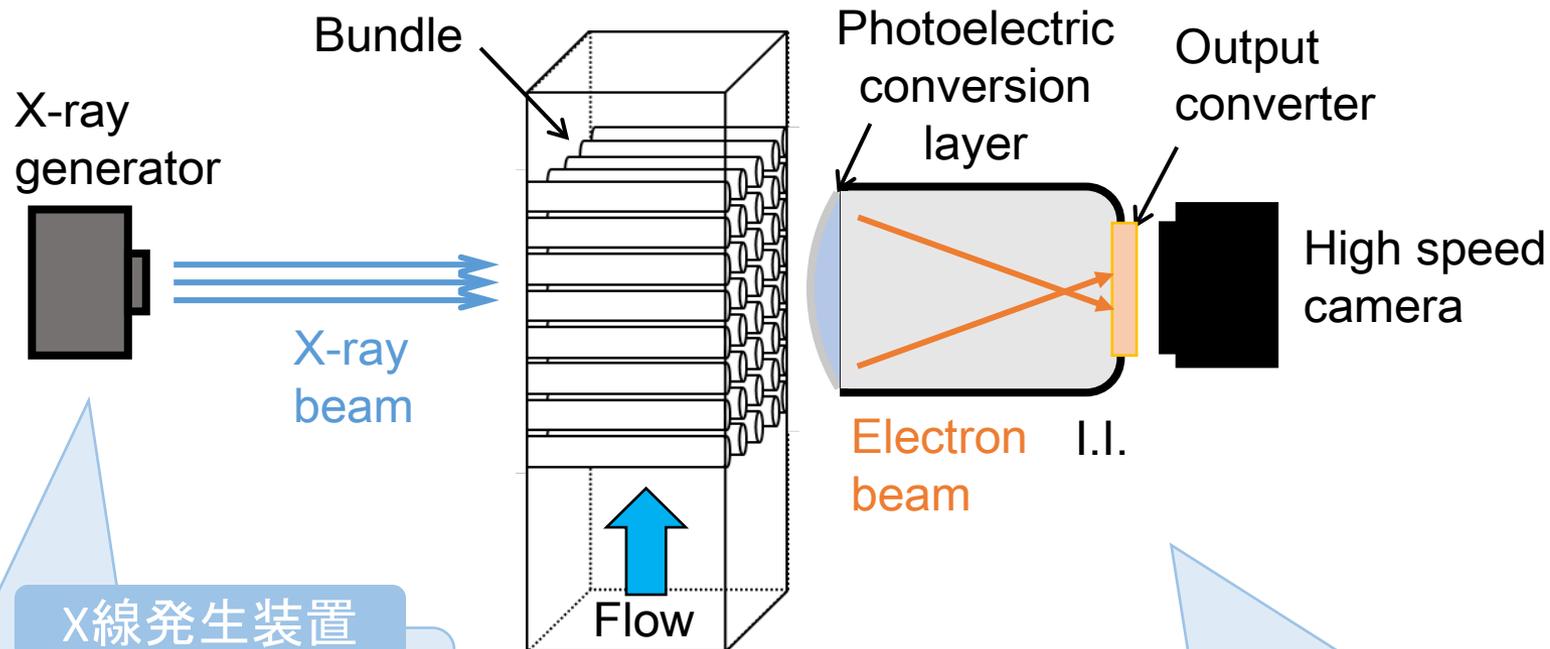
実験装置

作動流体	空気-水
圧力	大気圧下
水温	20~25°C
流路断面	90 × 90 mm ²



液相見かけ速度: J_L	0.1 ~ 0.3 m/s
気相見かけ速度: J_G	0.03 ~ 1.19 m/s

↳ **Minimum gap** で断面を定義



X線発生装置

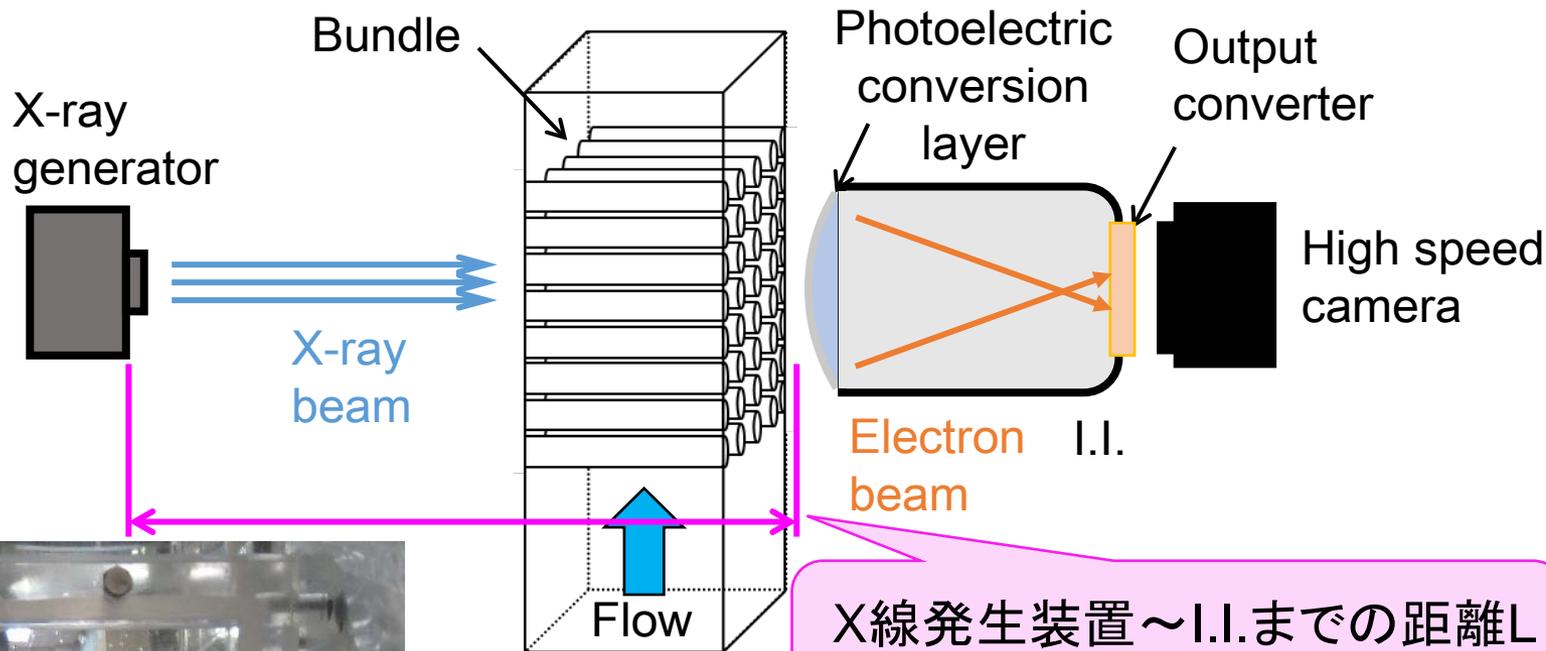
印加電圧 : 80kV, 5mA

撮像装置

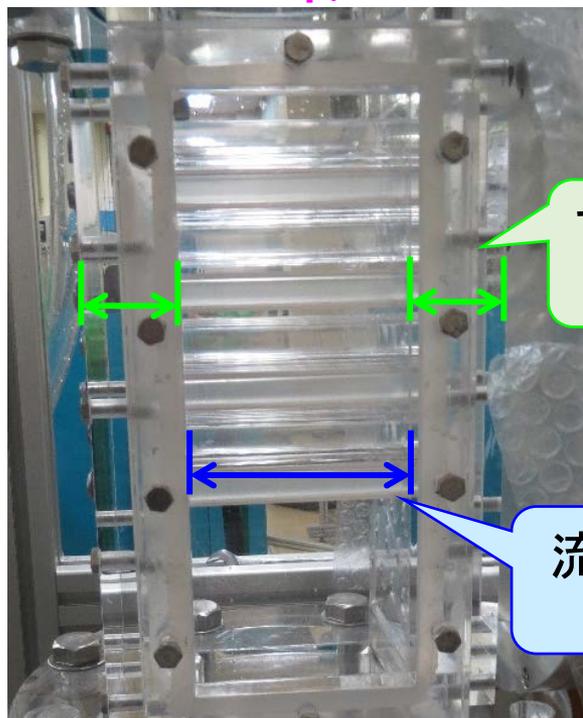
中性子 I.I.

高速度カメラ: IDT社製 Motion Pro Y-4 Lite
(画素数 1024 × 1024 pixel)

フレームレート: 30fps



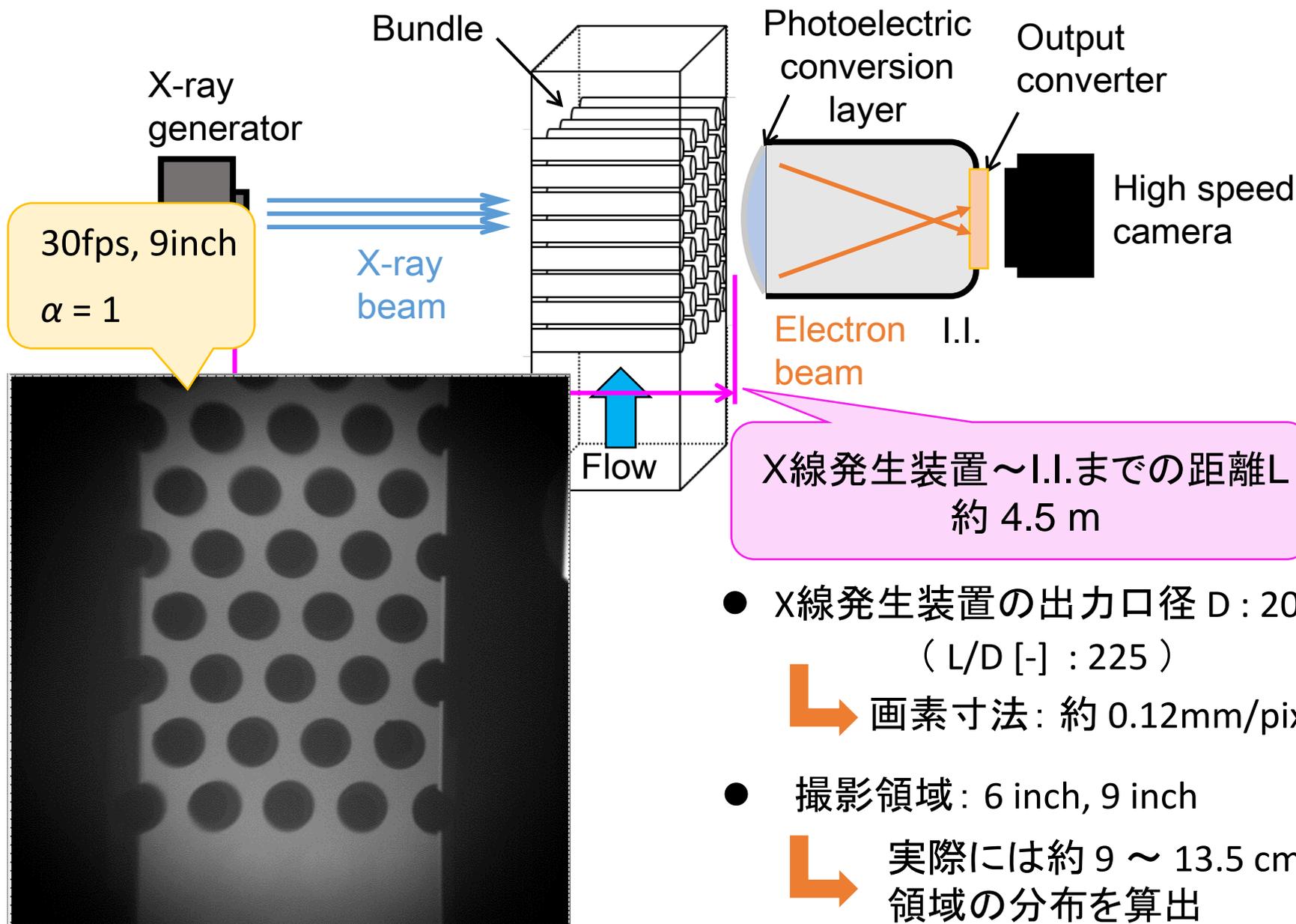
X線発生装置～I.I.までの距離L
約 4.5 m

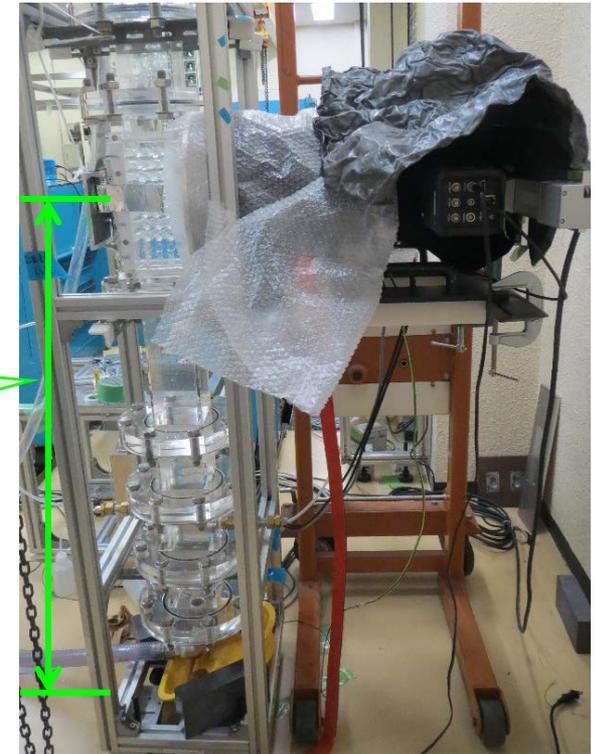
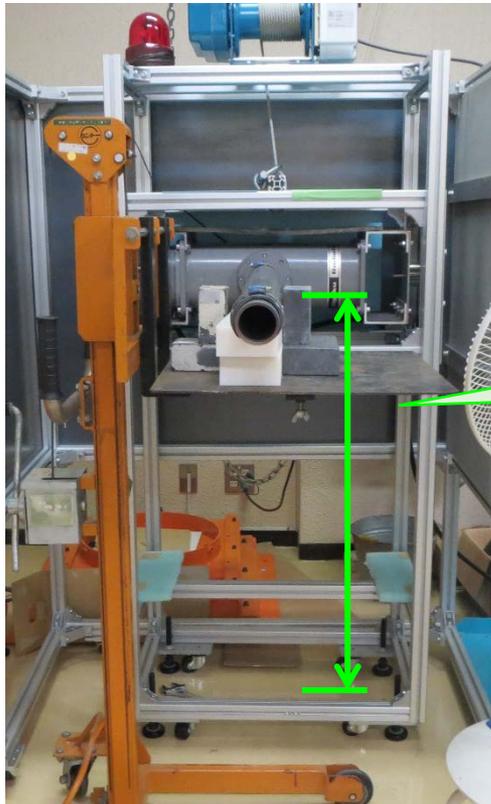
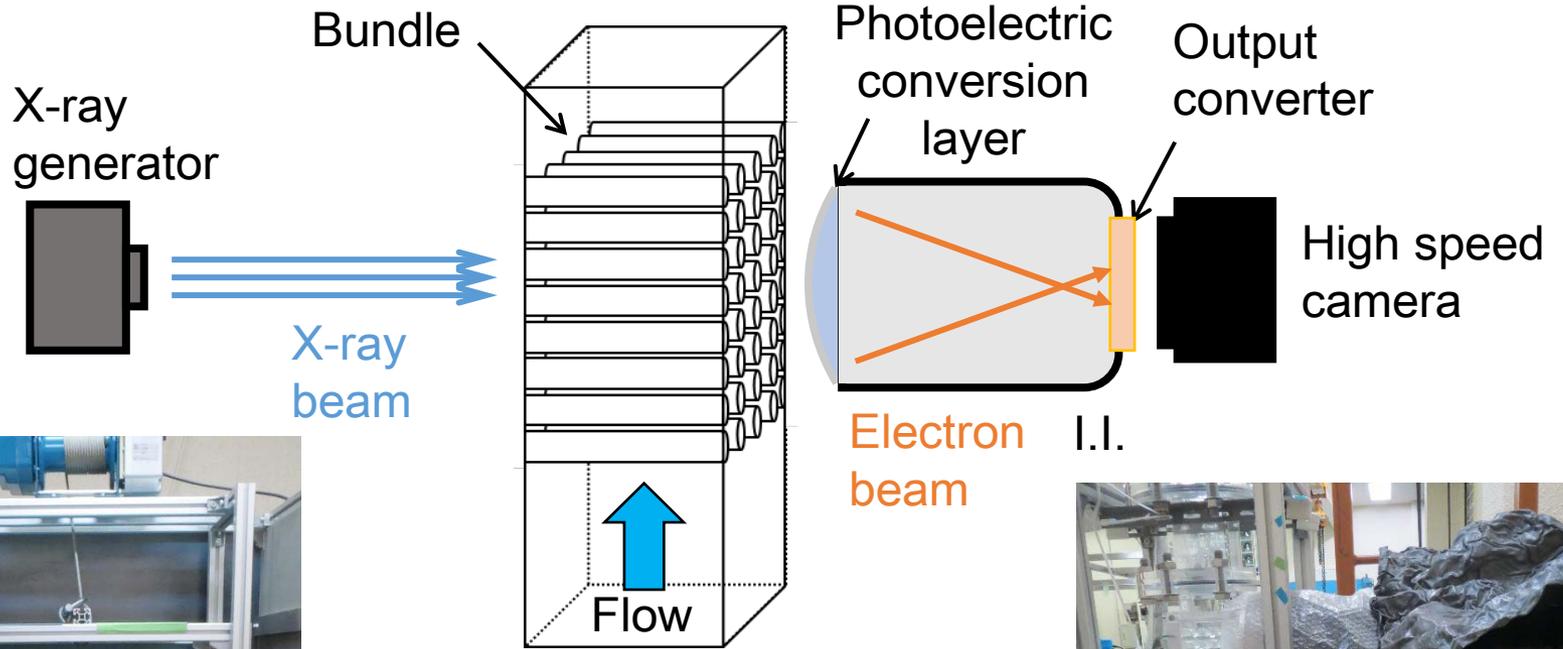


アクリル壁面
厚み35mm

流路内厚み
90mm

- X線発生装置の出力口径 $D : 20\text{mm}$
($L/D [-] : 225$)
↳ 画素寸法: 約 0.12mm/pixel
- 撮影領域: 6 inch, 9 inch
↳ 実際には約 $9 \sim 13.5\text{ cm}$ の領域の分布を算出





輝度分布 $S(x,y)$:

G : Gain
 O : Offset

$$\alpha = 1 \quad S_g(x, y) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mw} t_w(x, y)] + O_g(x, y)$$

$$\alpha = 0 \quad S_l(x, y) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mw} t_w(x, y) - \rho_l \mu_{ml} t_l(x, y)] + O_l(x, y)$$

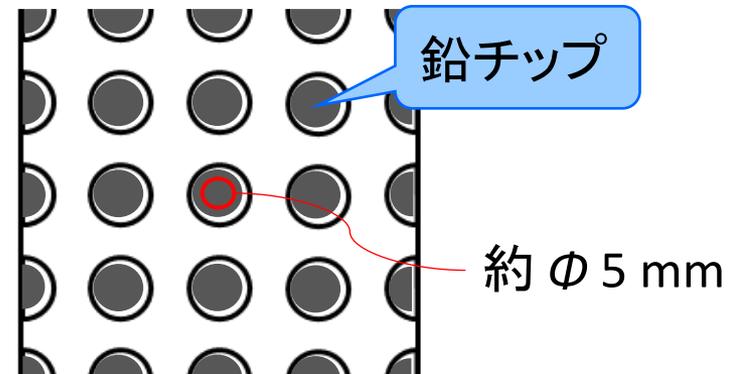
二相流 $S_{TP}(x, y) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mw} t_w(x, y) - \{1 - \alpha(x, y)\} \rho_l \mu_{ml} t_l(x, y)] + O_{TP}(x, y)$

Void fraction $\alpha(x, y) = \ln \left\{ \frac{S_{TP}(x, y) - O_{TP}(x, y)}{S_l(x, y) - O_l(x, y)} \right\} / \ln \left\{ \frac{S_g(x, y) - O_g(x, y)}{S_l(x, y) - O_l(x, y)} \right\}$

	Brightness [-]
$\alpha = 1$	105
$\alpha = 0$	11

※1/30 [s]あたりの輝度

オフセット領域



X線の減衰

$$I = I_0 \exp(-\rho\mu_m t)$$

I : 透過したX線の強度

I_0 : 入射したX線の強度

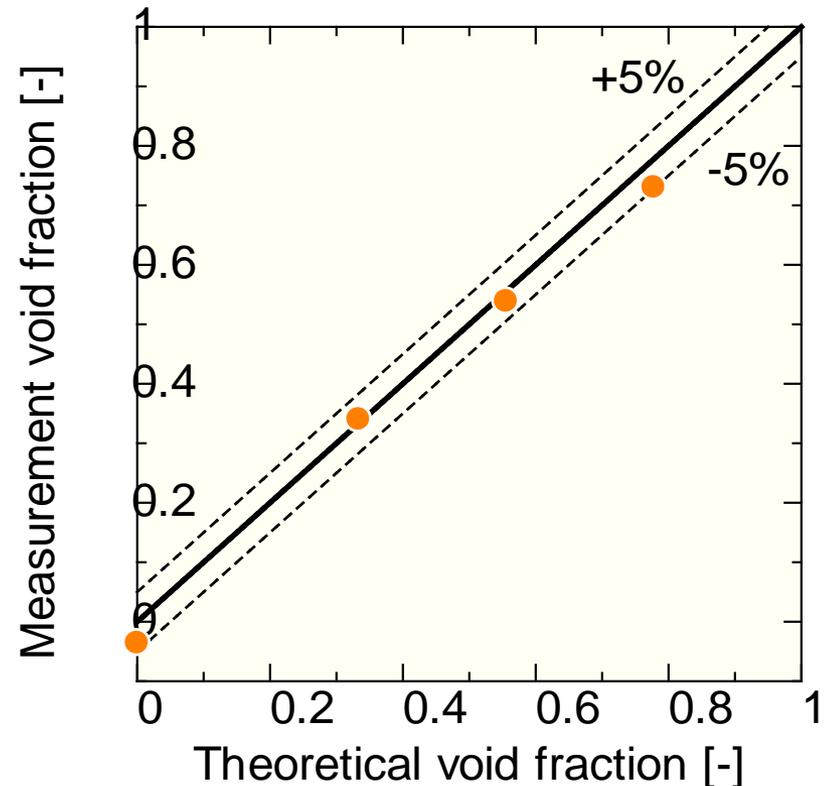
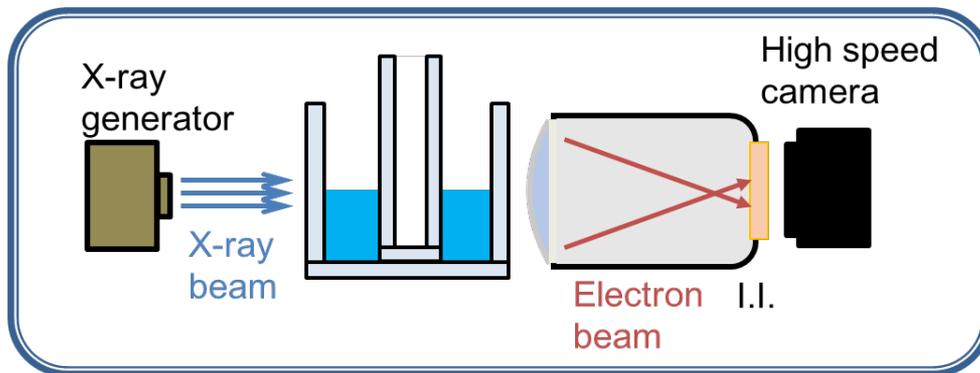
ρ : 密度 μ_m : 質量減衰係数 t : 厚み

管群撮影時の $\alpha = 0, \alpha = 1$ の状態から
質量減衰係数を算出

$$\mu_m = 0.25 \text{ [cm}^2\text{/g]}$$

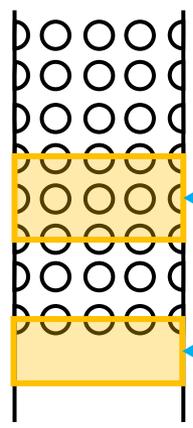
空隙が既知の状態での撮影

空隙 = 0, 33, 56, 78 [%]



高速度カメラによる
流動観察結果

フレームレート	1000 fps
再生レート	30 fps



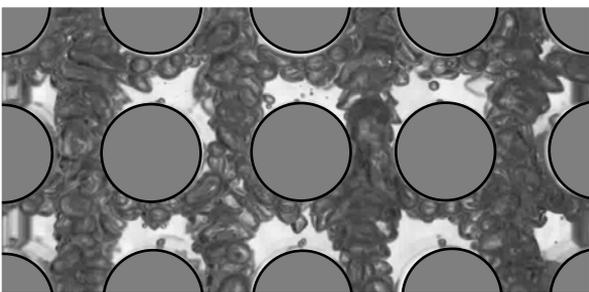
可視化領域:

$$J_L = 0.2 \text{ m/s}$$

4列目管周り

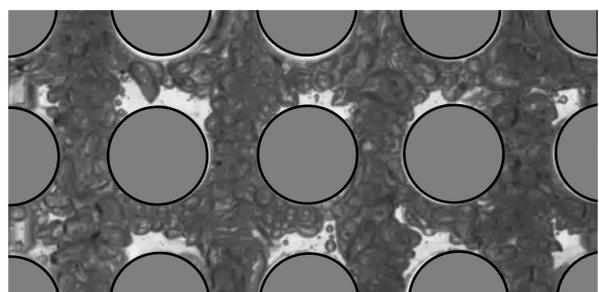
入口付近

気泡流



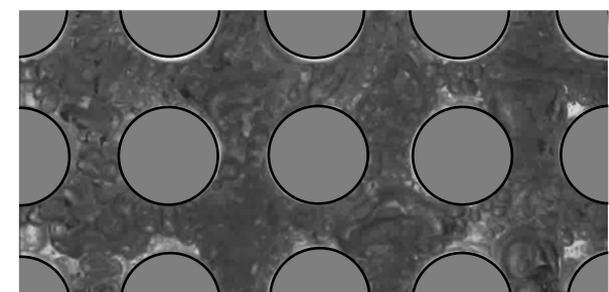
$$J_G = 0.12 \text{ m/s}$$

遷移域



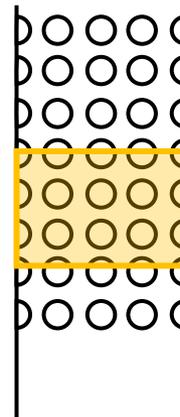
$$J_G = 0.25 \text{ m/s}$$

間欠流



$$J_G = 1.05 \text{ m/s}$$

X線ラジオグラフィにより
得られたボイド率分布
動画



撮影領域:

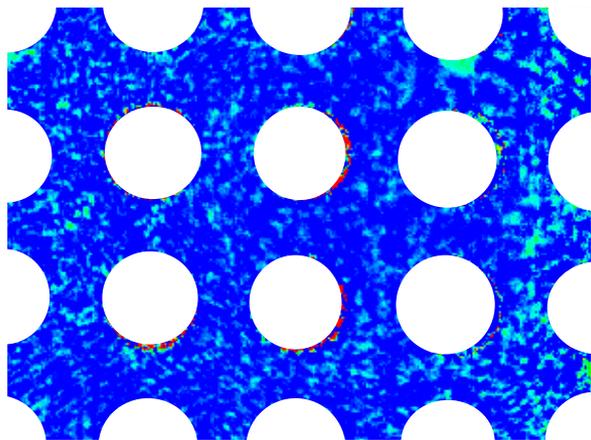
4列目管周り付近

$$J_L = 0.2 \text{ m/s}$$

フレームレート	30 fps
再生レート	10 fps

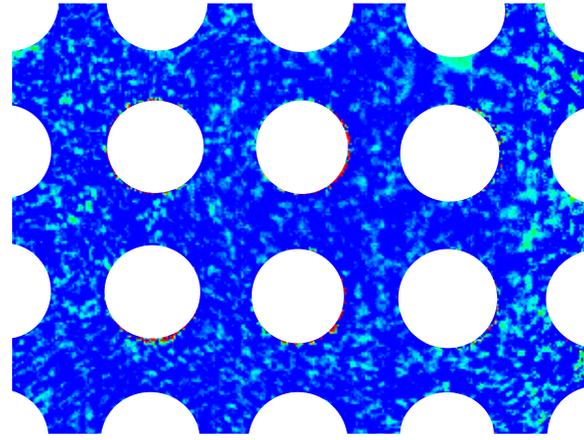


気泡流



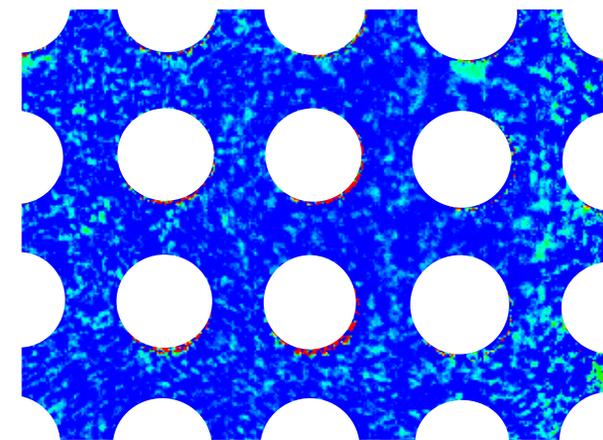
$$J_G = 0.12 \text{ m/s}$$

遷移域



$$J_G = 0.25 \text{ m/s}$$

間欠流



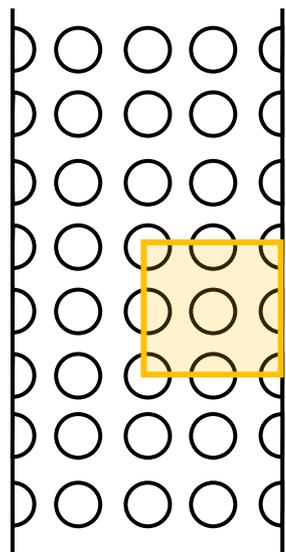
$$J_G = 1.05 \text{ m/s}$$

二次元ボイド率分布

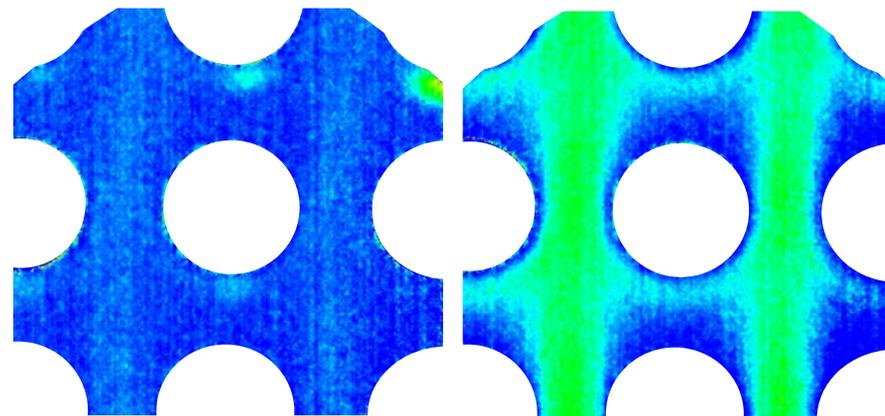
$J_L = 0.2 \text{ m/s}$

15秒間平均

Void fraction



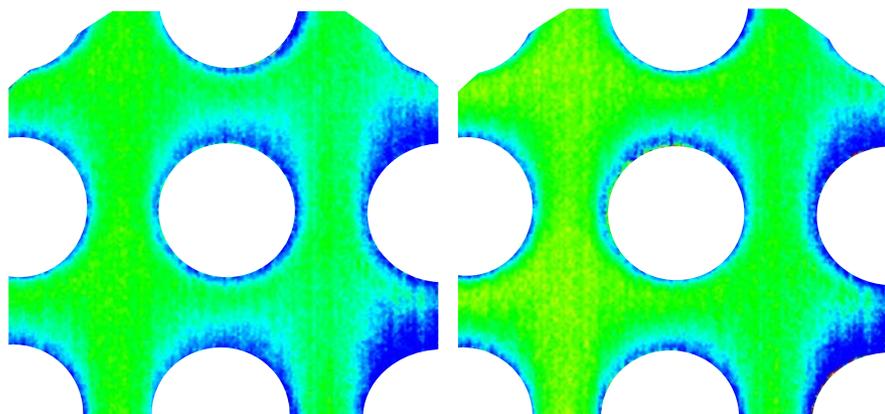
気泡流



$J_G = 0.03 \text{ m/s}$

$J_G = 0.12 \text{ m/s}$

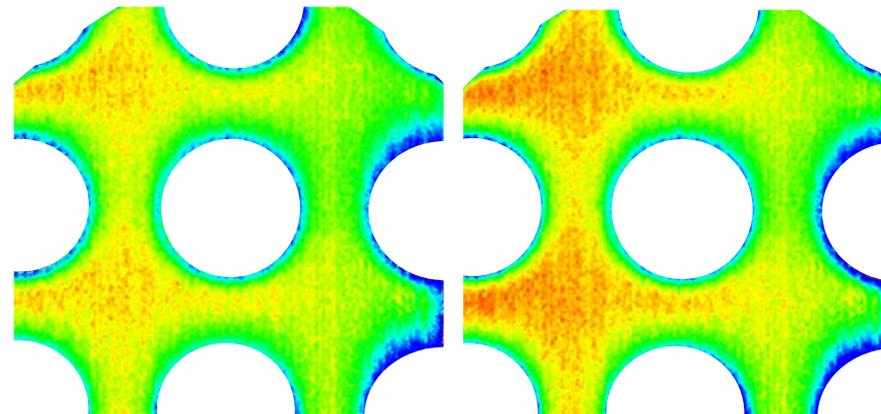
遷移域



$J_G = 0.25 \text{ m/s}$

$J_G = 0.43 \text{ m/s}$

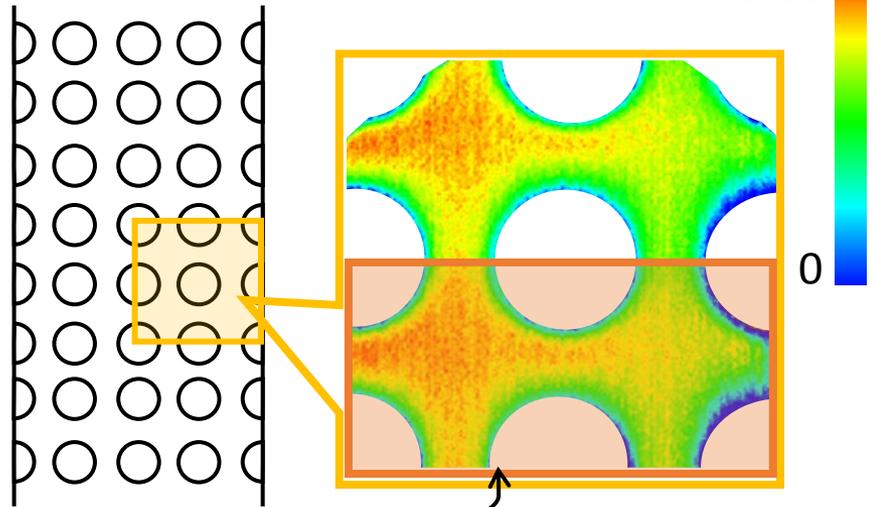
間欠流



$J_G = 0.74 \text{ m/s}$

$J_G = 1.05 \text{ m/s}$

Void fraction distribution
 ($J_L = 0.2 \text{ m/s}$, $J_G = 0.74 \text{ m/s}$)

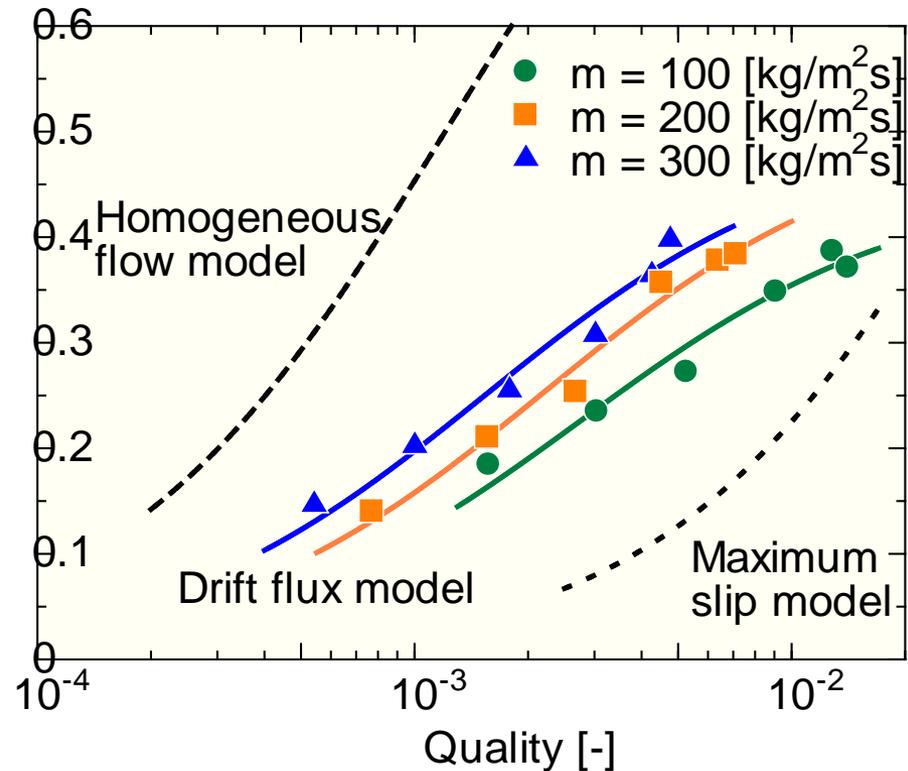


空間平均領域: 3~4列ギャップ

$$\alpha = \frac{xv_G}{xv_G + k(1-x)v_L}$$

$$\begin{cases} k = 1 & \text{Homogeneous model} \\ k = \sqrt{v_G/v_L} & \text{Maximum slip model}^{(1)} \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{J_G}{C_0 J_T + V_{Gj}} \quad \text{Drift flux model}$$



(1) Chisholm, D., Gerge Godwin, London and New York, 1983

X線ラジオグラフィを用いて、水平バンドル内気液二相流のボイド率分布計測を行った。

- ✓ 中性子 I. I. および高速度カメラを用いて、 $90 \times 90 \text{ mm}^2$ の矩形流路内のボイド率分布を計測できることを確認。ボイド率は $\pm 5\%$ 以内の誤差で評価できる。
- ✓ 各流動様式に対する管群内部のボイド率分布が得られた。