

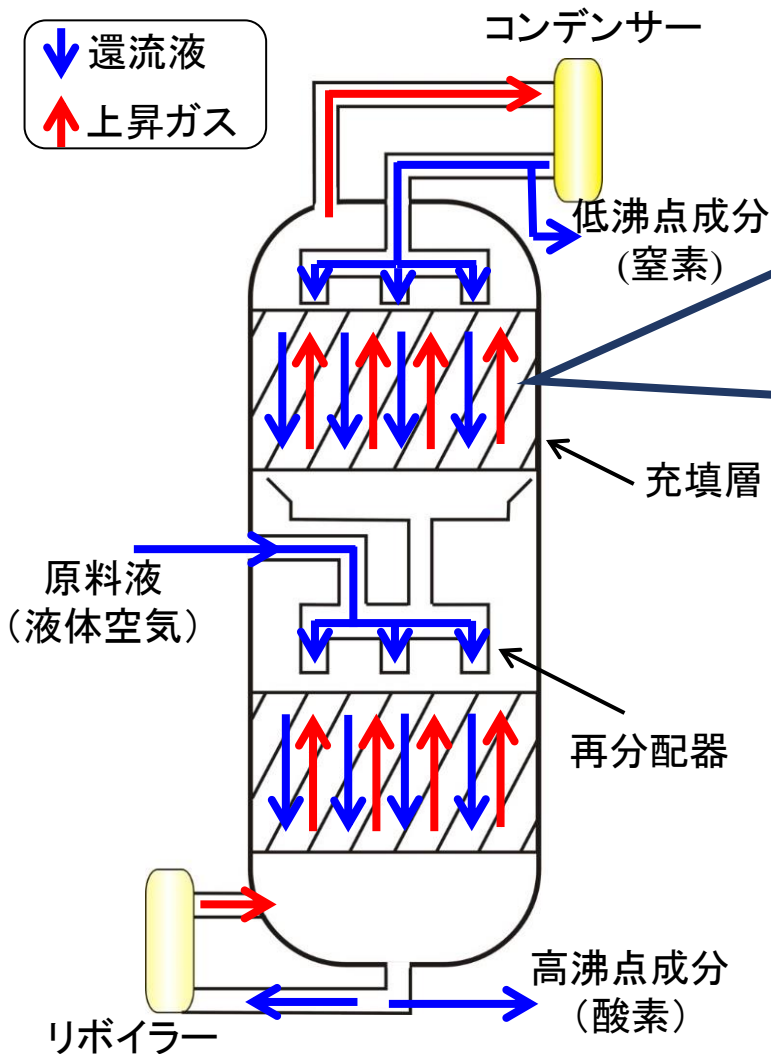


中性子ラジオグラフィによる規則充填物内流動の可視化

○平賀 龍哉(関西大院) 梅川 尚嗣(関西大) 網 健行(関西大)
Ryuya HIRAGA Hisashi UMEKAWA Takeyuki AMI

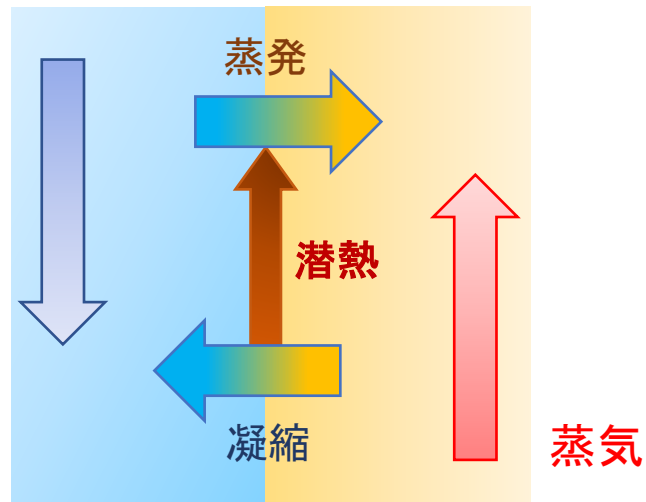
研究背景

充填塔概略図



蒸留原理

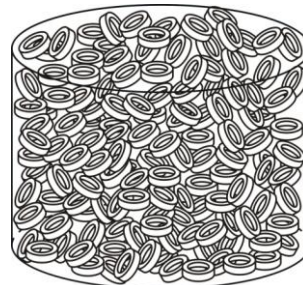
還流液



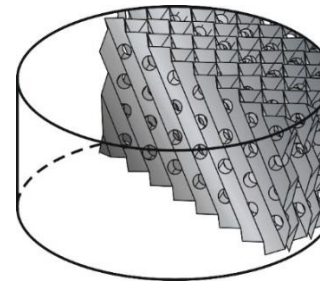
充填物

- 気液界面積濃度の増加
- 滞留時間の増加

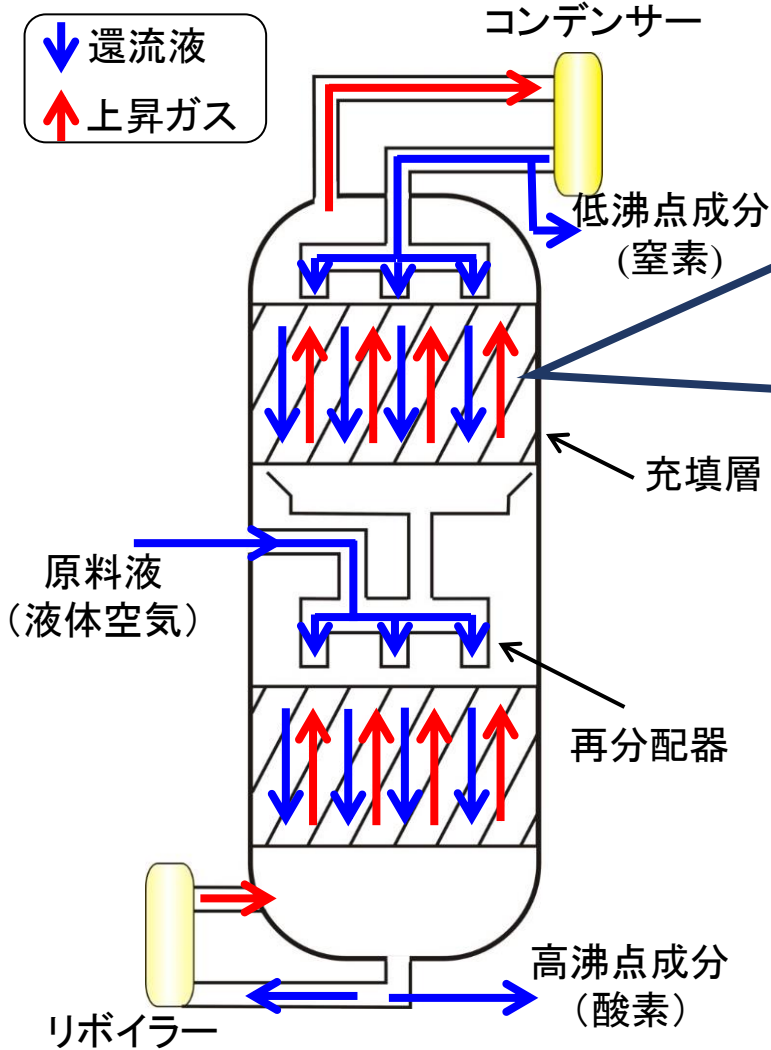
不規則充填物



規則充填物

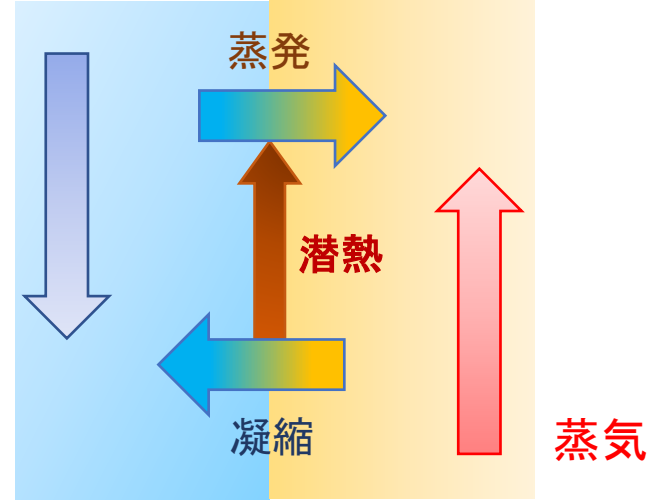


充填塔概略図



蒸留原理

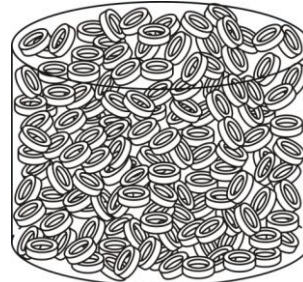
還流液



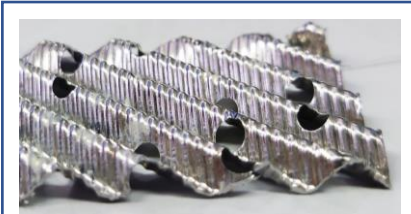
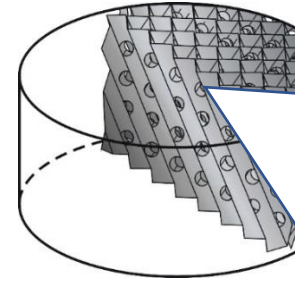
充填物

- 気液界面積濃度の増加
- 滞留時間の増加

不規則充填物



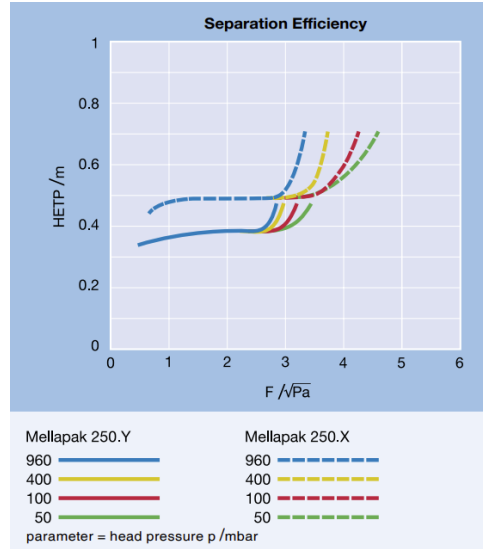
規則充填物



Height Equipment to a Theoretical Plate

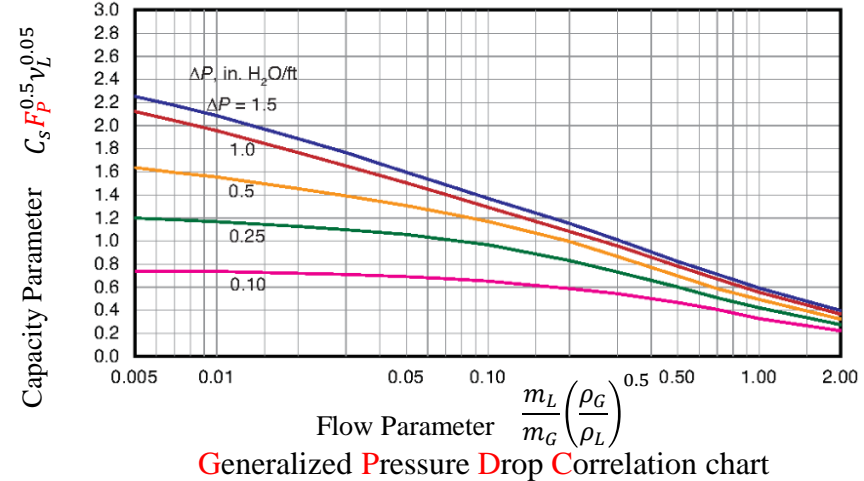


0602 2510



$$F\text{-factor } F = u \sqrt{\rho_g}$$

Flooding



$$\text{Pressure drop at flooding } \Delta P_{FL} = 0.115 F_P^{0.7}$$

F_P Packing factor

$$\text{Capacity factor } C_s = j_g \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V}}$$

研究目的

- ・充填塔は実測データに基づいた設計が行われている
- ・規則充填物の構造が内部流動に与える影響の詳細情報が少ない

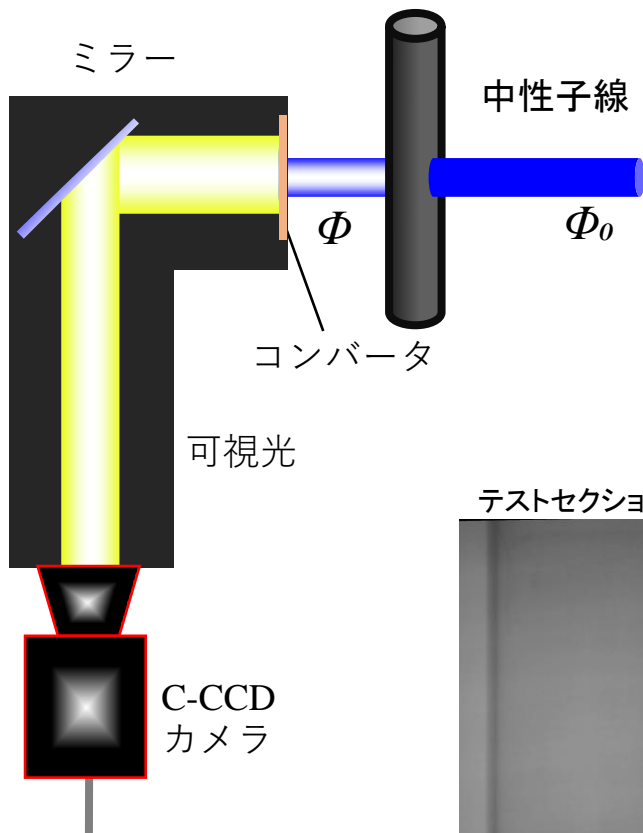
- 規則充填物内での三次元的な流動特性把握
- 充填物構造が流動に与える影響評価

➔ 熱中性子ラジオグラフィを用いた可視化、CT再構成による内部流動状態の3次元把握

実験装置

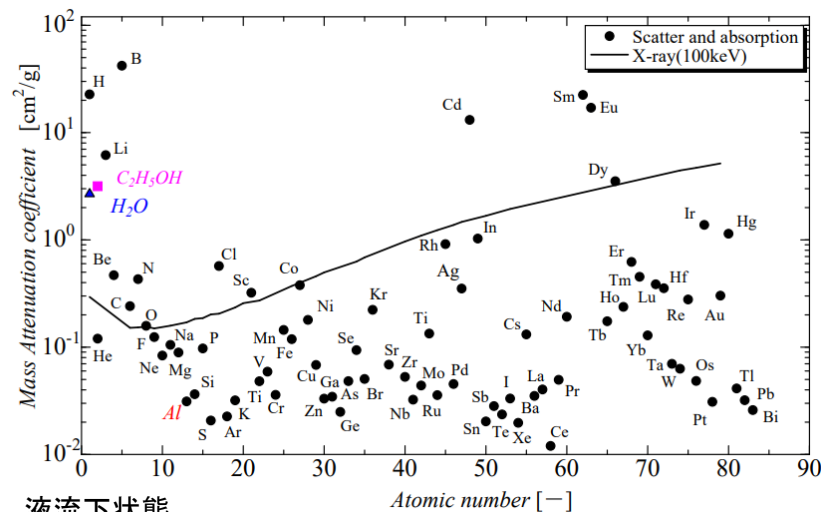
中性子ラジオグラフィ原理

【JAEA JRR-3 7R TNRF】



$$\phi = \phi_0 \exp(-\rho \mu_m \delta)$$

密度： ρ [g/cm³]
質量減衰係数： μ_m [cm²/g]
透過厚さ： δ [mm]



テストセクションのみ



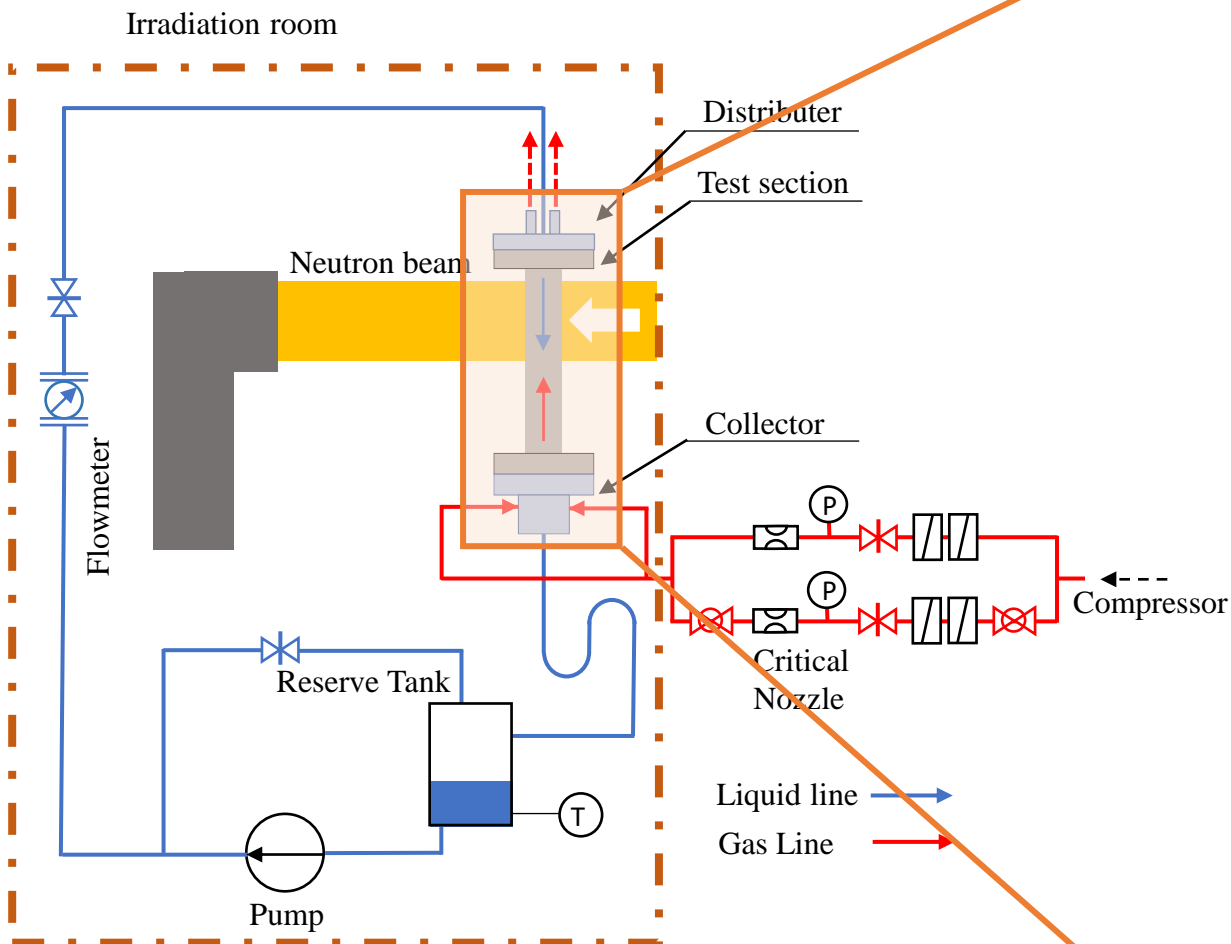
液流下状態



水・エタノール：✓強く減衰
金属：✓透過しやすい

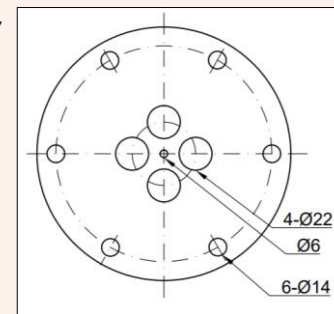
➡ 金属管内流動の
可視化に適している

概略図

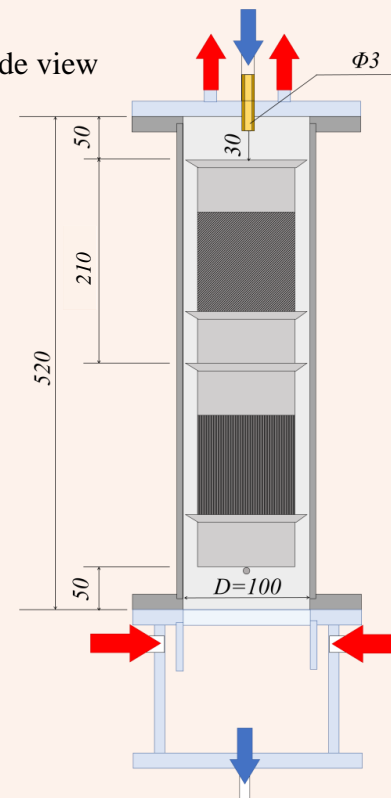


テストセクション

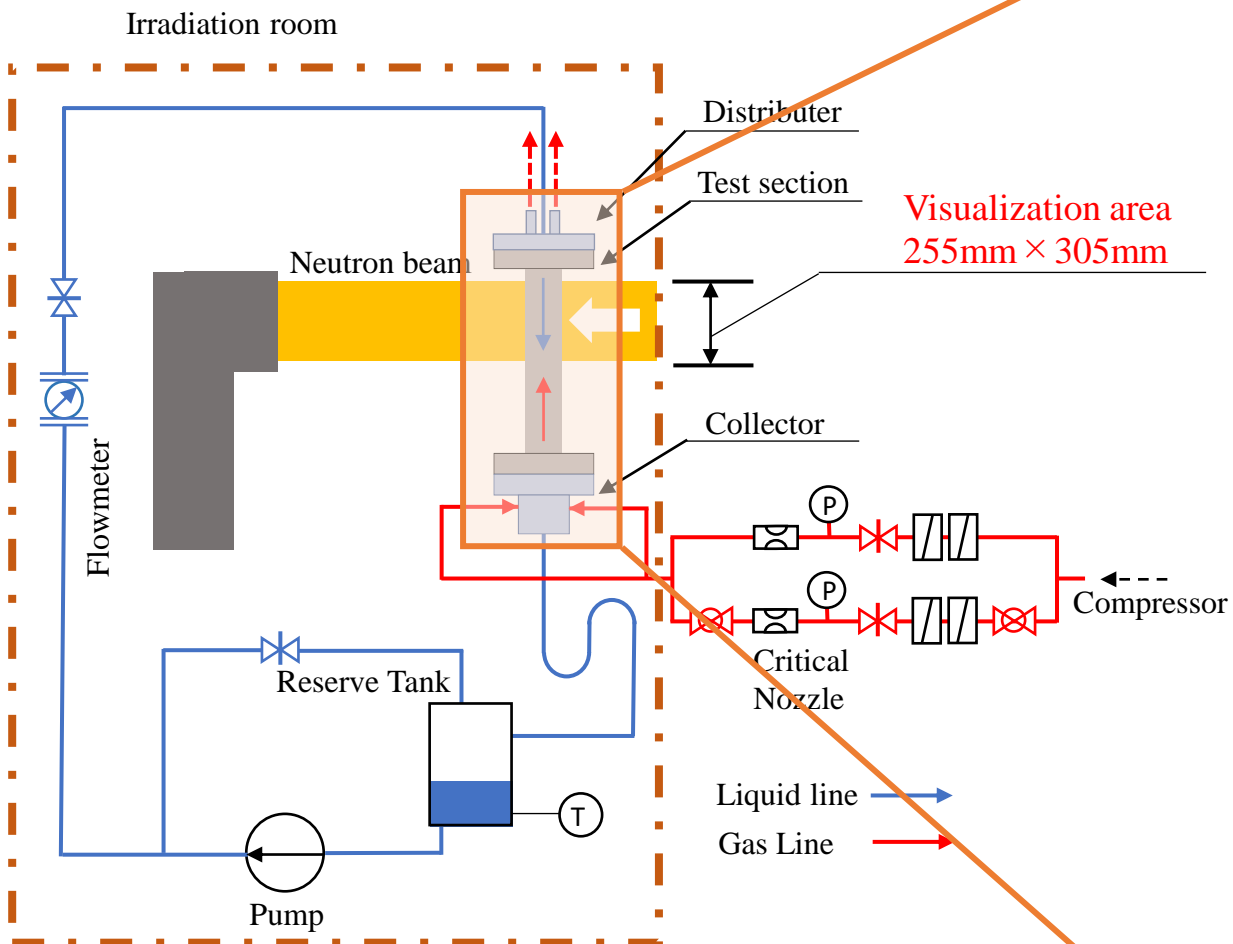
Top view



Side view

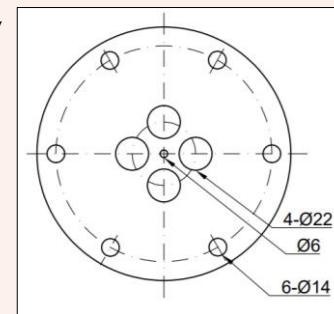


概略図

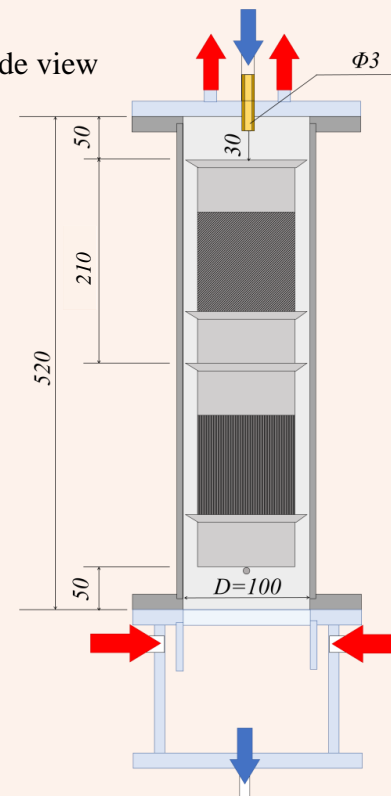


テストセクション

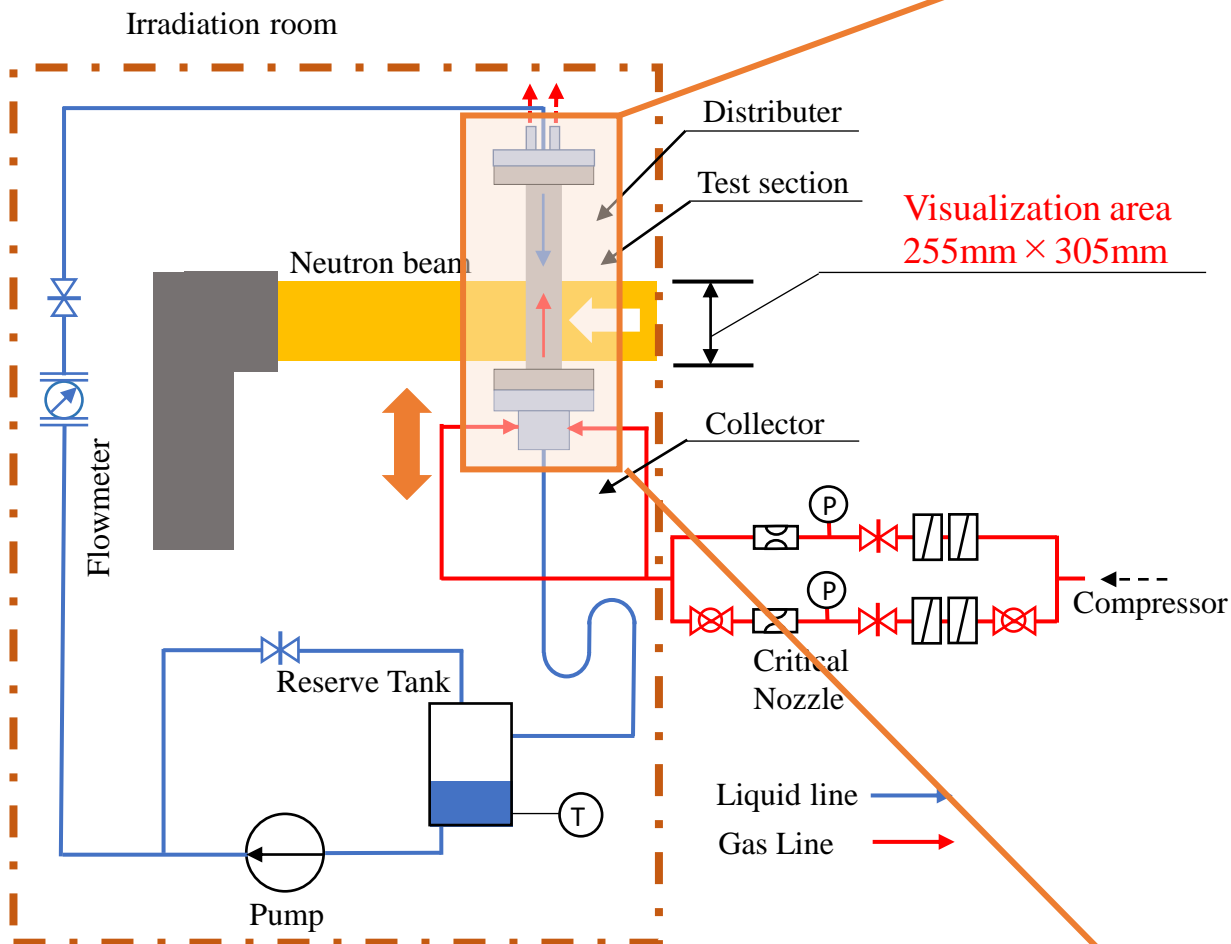
Top view



Side view

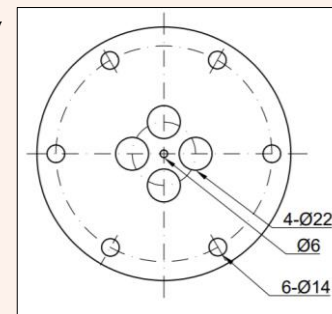


概略図

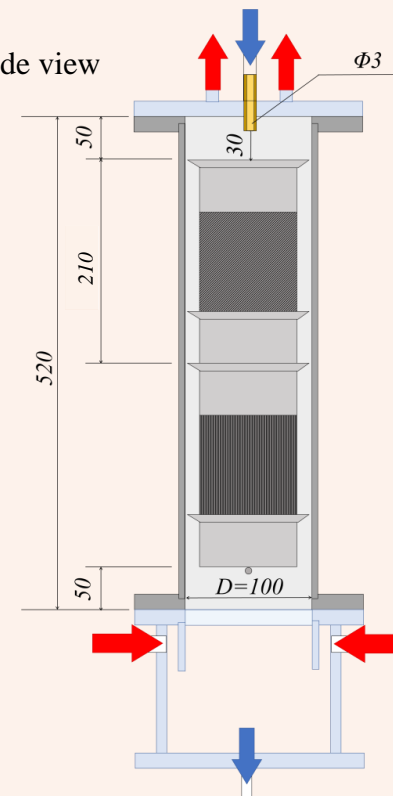


テストセクション

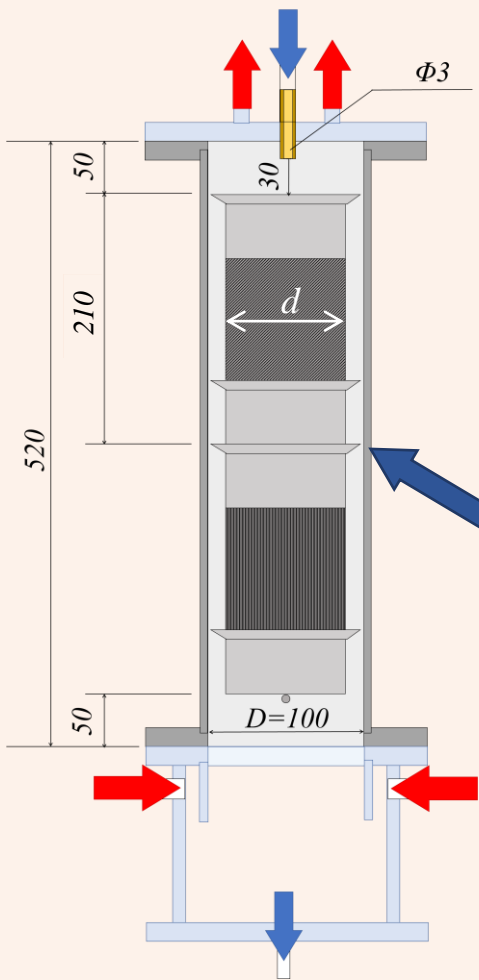
Top view



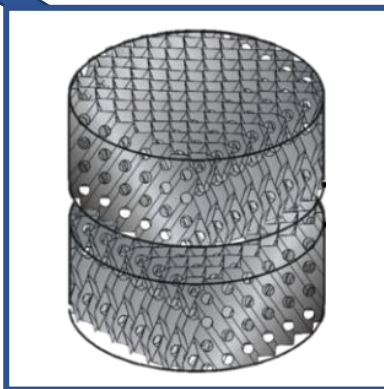
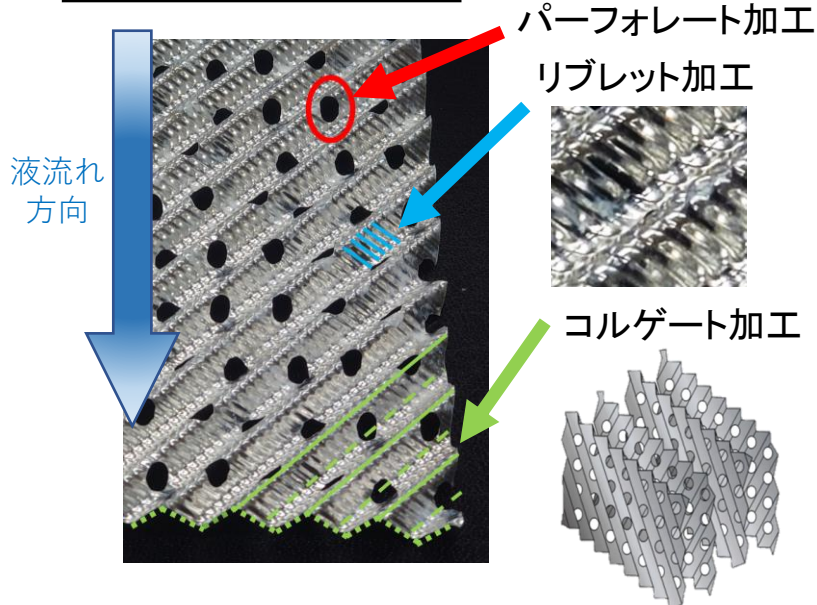
Side view



テストセクション



規則充填物(750Y) アルミニウム製



直径 : d	90 [mm]
高さ : h	210 [mm]
水力相当直径 : d_h	7.2 [mm]

比表面積		750 [m^2/m^3]
コルゲート加工	高さ	4 [mm]
	間隔	8 [mm]
	角度	45 [deg.]
パーフォレート加工	直径	4 [mm]
	高さ	1 [mm]
リブレット加工	間隔	1 [mm]
	角度	90 [deg.]

作動流体

水, エタノール水溶液10, 20, 30, 40, 80%, エタノール

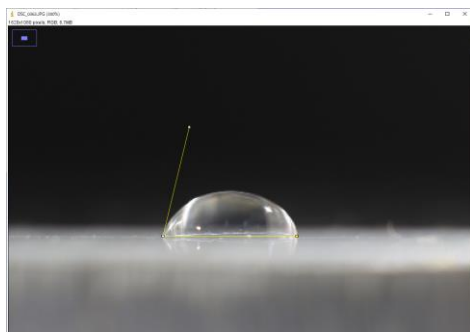
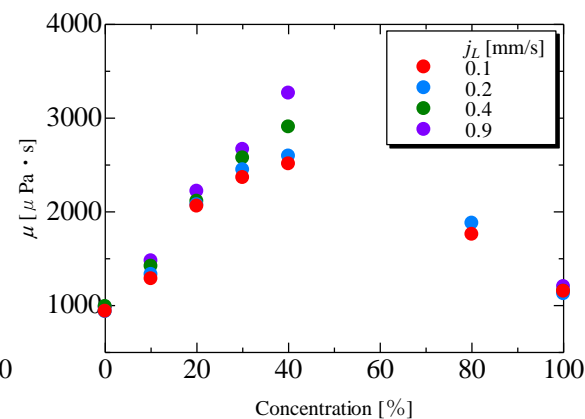
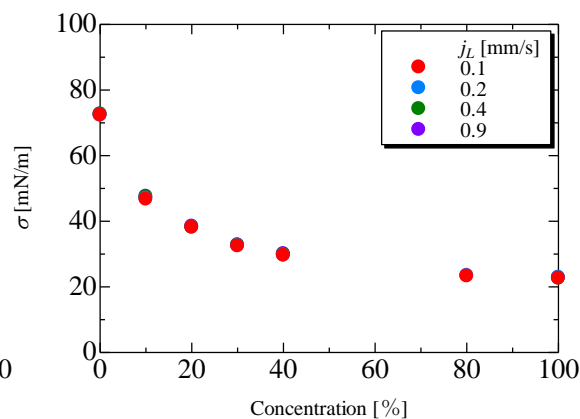
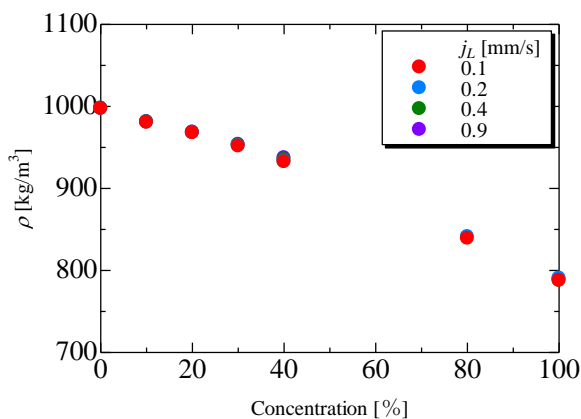
実験条件

	気相(空気)-液相
液相体積流束 : j_L [mm/s]	0.1, 0.2, 0.4, 0.9
気相体積流束 : j_G [m/s]	0 ~ 1.5

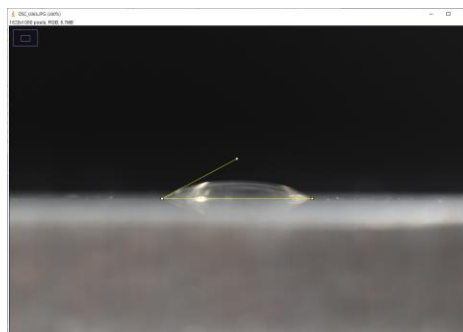
物性値

20 [°C]

	水	エタノール 水溶液 40%	エタノール	(液体窒素)	(液体酸素)
粘度 : μ_L [$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$]	1005	2910	1198	158	196
密度 : ρ_L [kg/m^3]	998	935	790	809	1142
表面張力 : σ_L [mN/m]	72.8	29.9	22.4	10.7	13.2
キャピラリー長 : l [mm]	2.73	1.81	1.70	1.16	1.09
質量減衰係数 : μ_m [cm^2/g]	2.68	2.78	3.16	0.430	0.158



水 : 76°

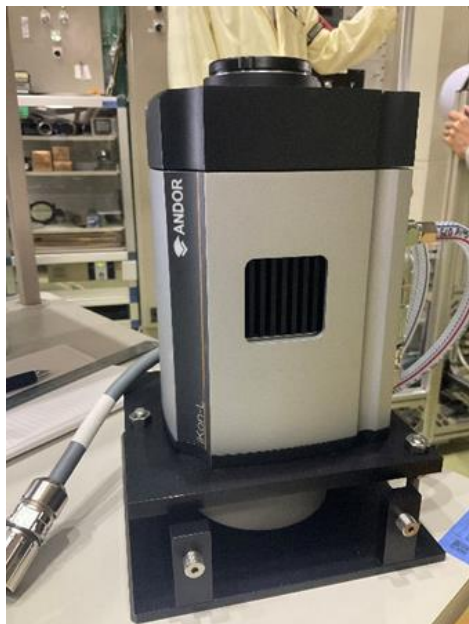


エタノール40% : 28°



エタノール100% : 15°

CT 再構成



カメラ情報

C-CCD カメラ	Andor iKon-L936
レンズ	85[mm] f 1.4
画素数	2048×2048[Pixel×Pixel]
空間分解能	106[$\mu\text{m}/\text{Pixel}$]

撮影条件

露光時間	1[s]
回転角度ステップ	0.6[deg.]
総回転角度	180[deg.]
撮影枚数	301[flame]



CT情報

空間分解能	524[$\mu\text{m}/\text{Pixel}$]
再構成手法	Filtered Back projection
フィルター	Shepp and Logan

内部状態は準定常状態と確認

実験結果 -透過画像 CT画像-



透過画像 $j_L = 0.4$ [mm/s] $j_G = 0$ [m/s]

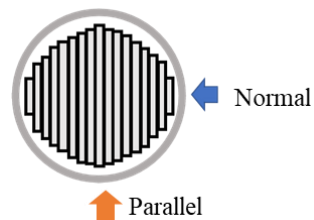
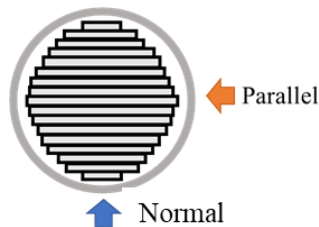
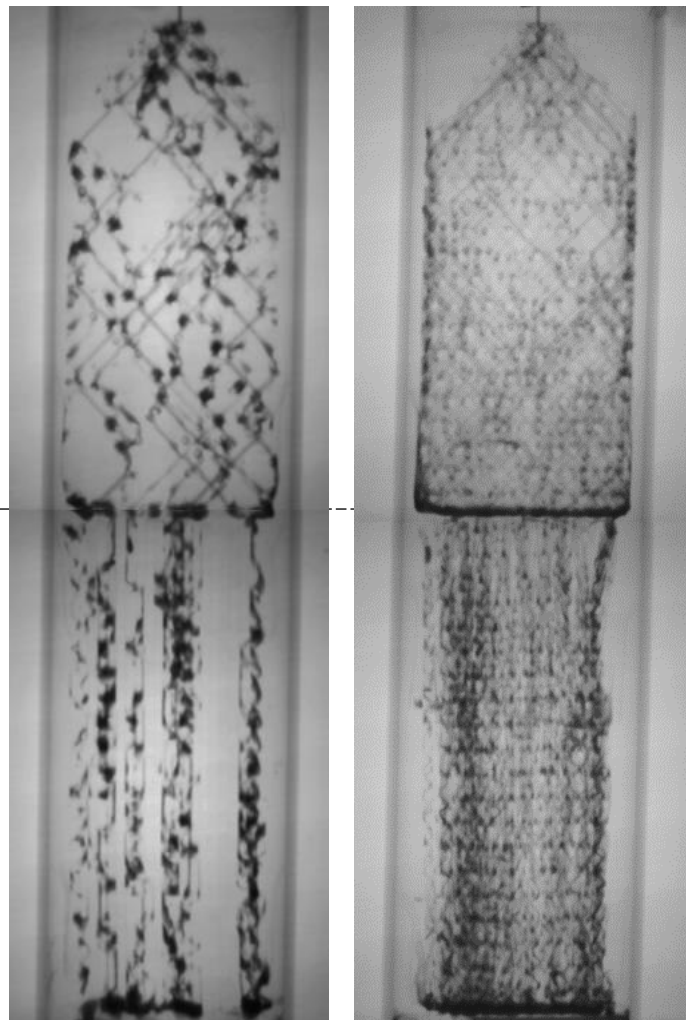
回転角度 0[deg.]

水

エタノール

Normal

Parallel



実験結果 -透過画像 CT画像-



透過画像 $j_L = 0.4$ [mm/s] $j_G = 0$ [m/s]

回転角度 0[deg.]

回転角度 90[deg.]

水

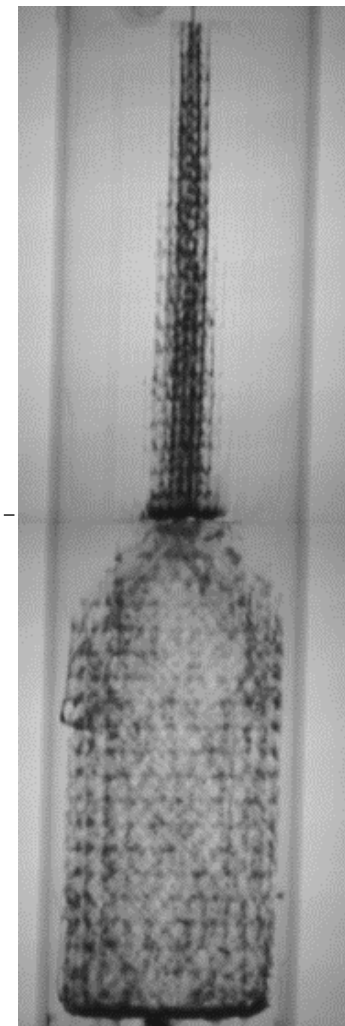
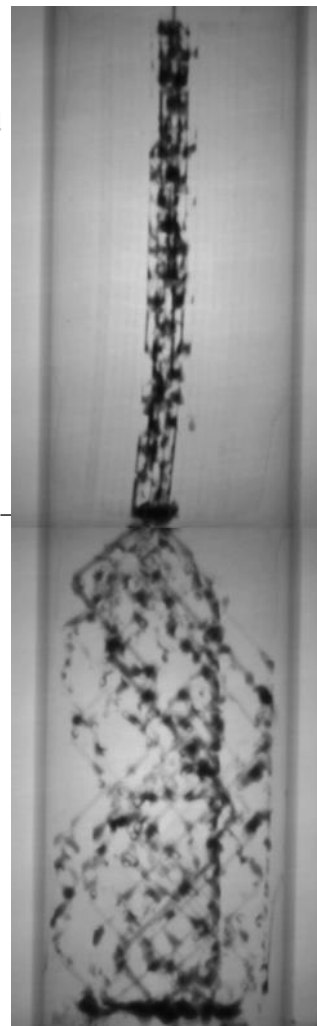
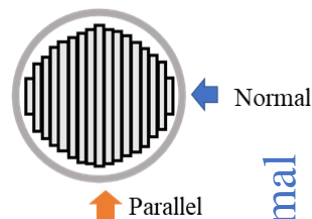
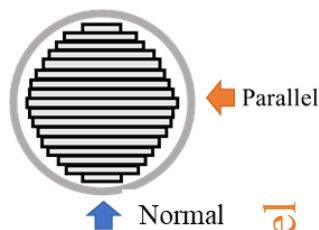
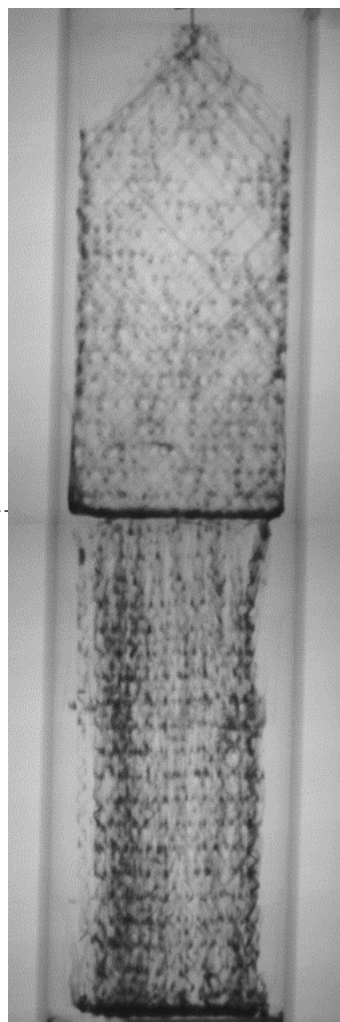
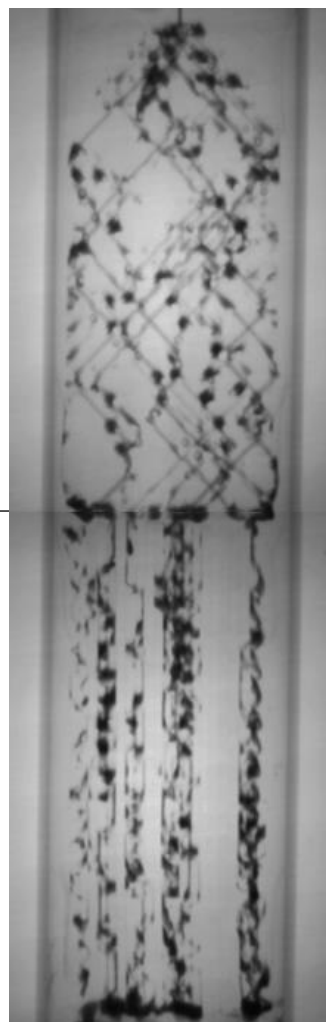
エタノール

水

エタノール

Normal

Parallel



Parallel

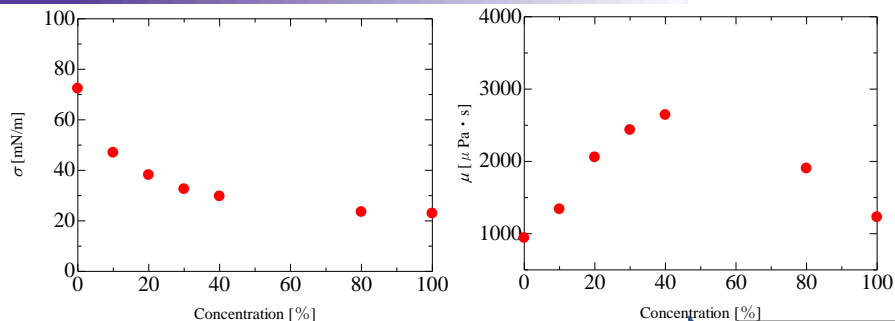
Normal

実験結果 -透過画像 CT画像-

透過画像

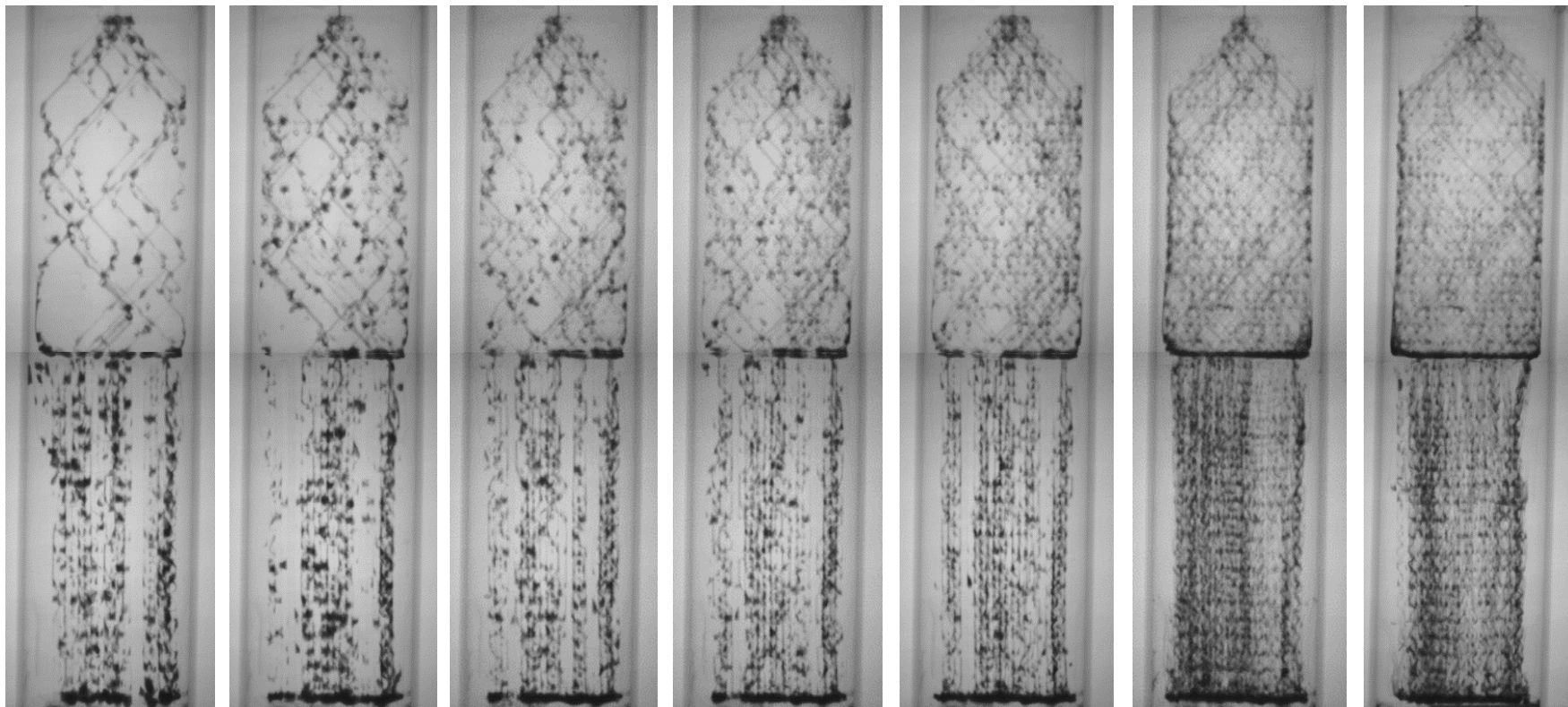
$j_L = 0.2$ [mm/s] $j_G = 0$ [m/s]

回転角度 0 [deg.]



Normal

Parallel

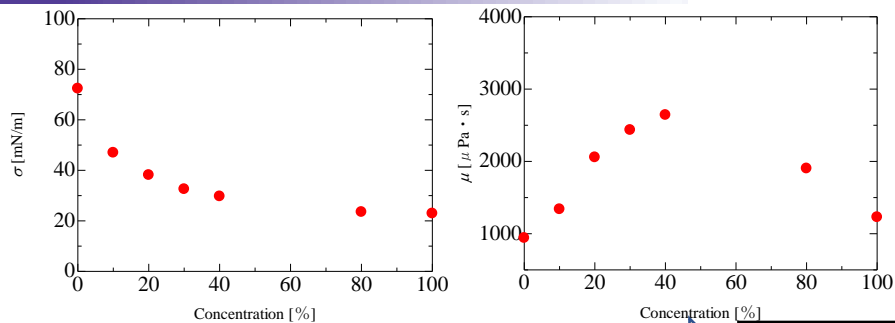


実験結果 -透過画像 CT画像-

透過画像

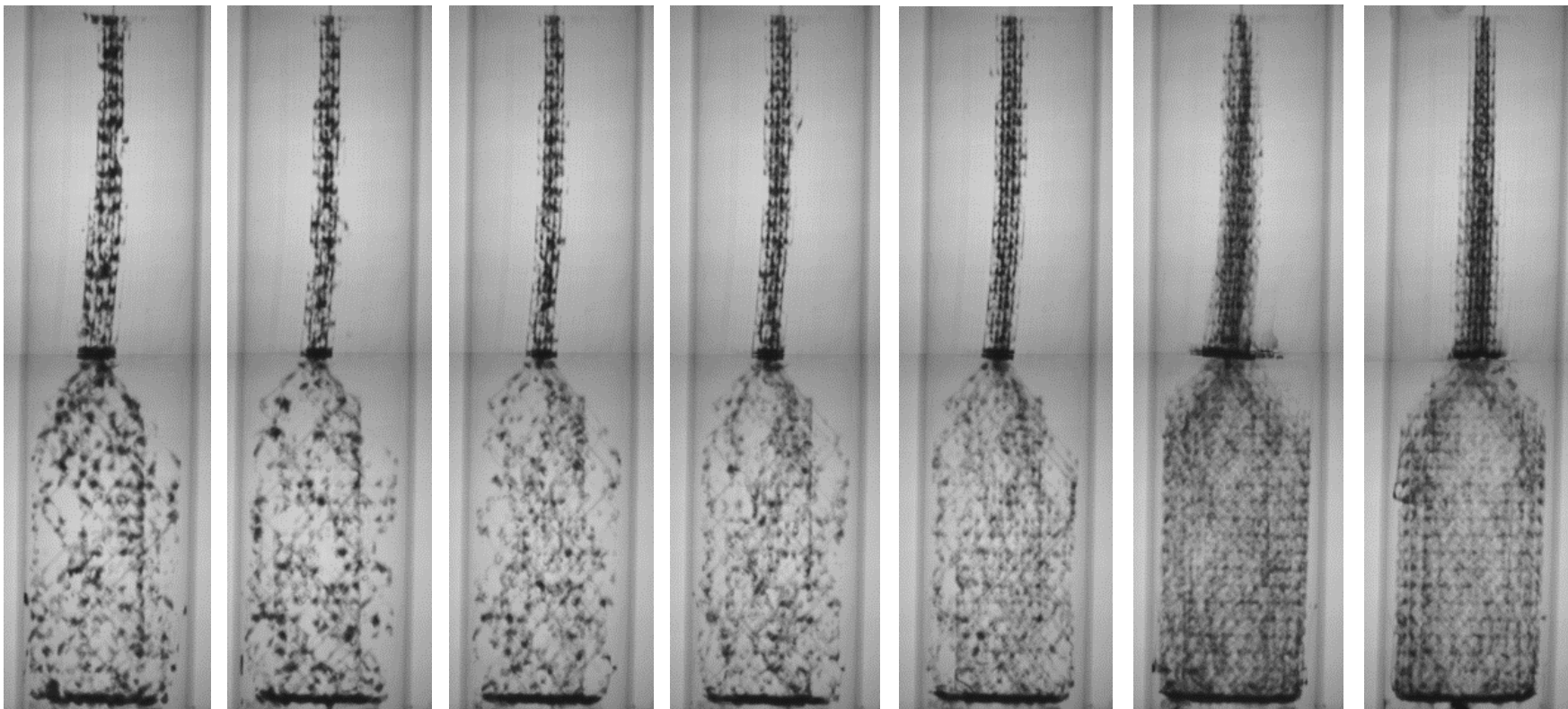
$j_L = 0.2$ [mm/s] $j_G = 0$ [m/s]

回転角度 90[deg.]



Parallel

Normal

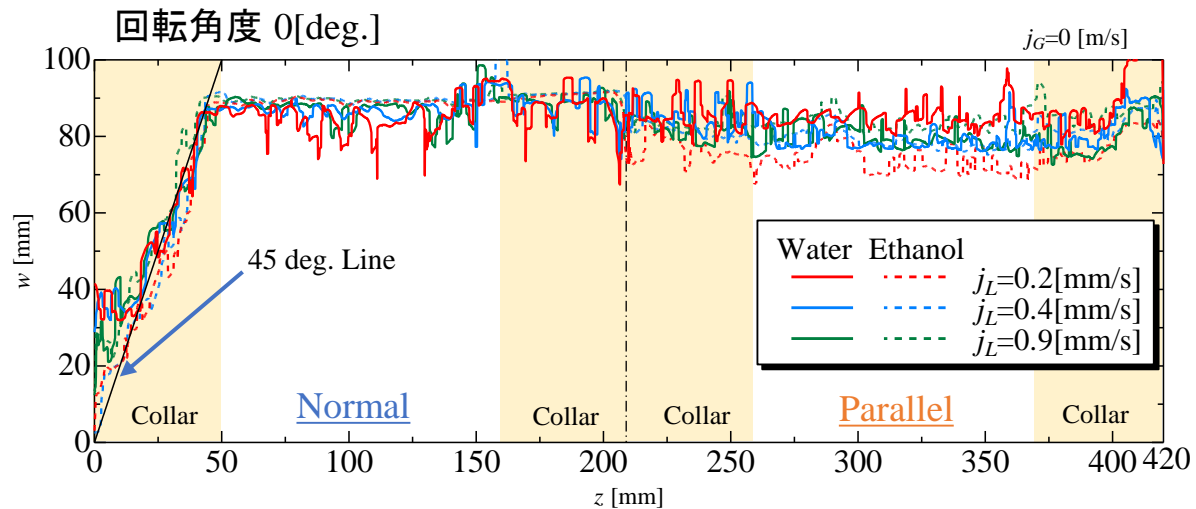
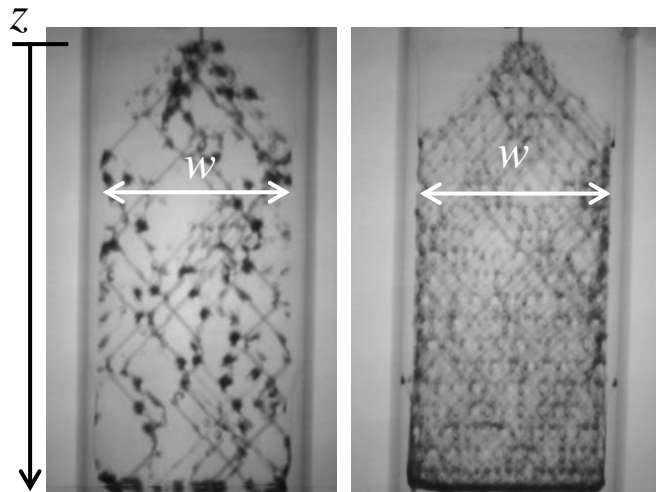


実験結果 -液分配特性評価-



各位置における液幅

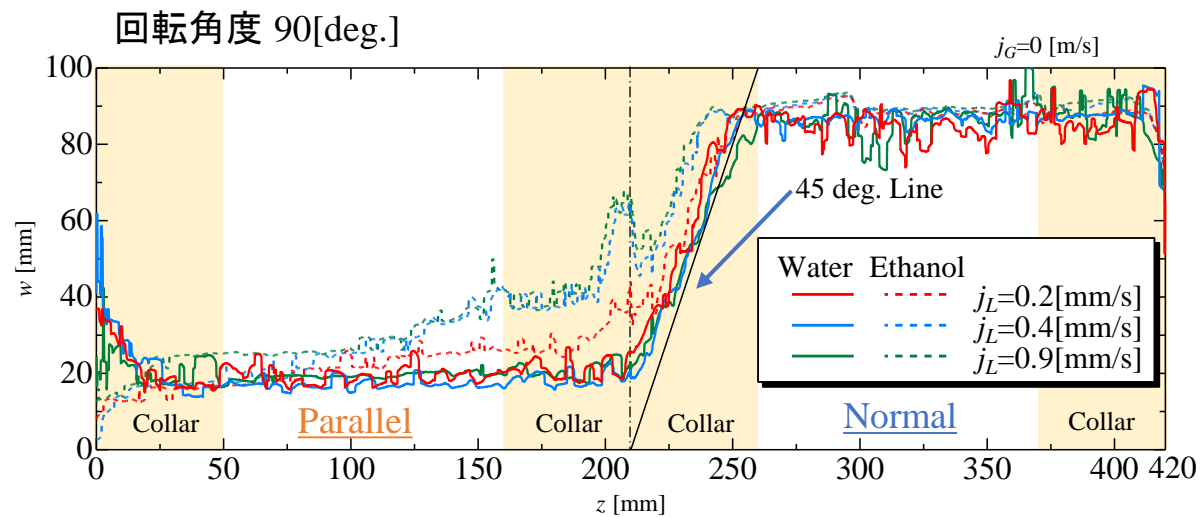
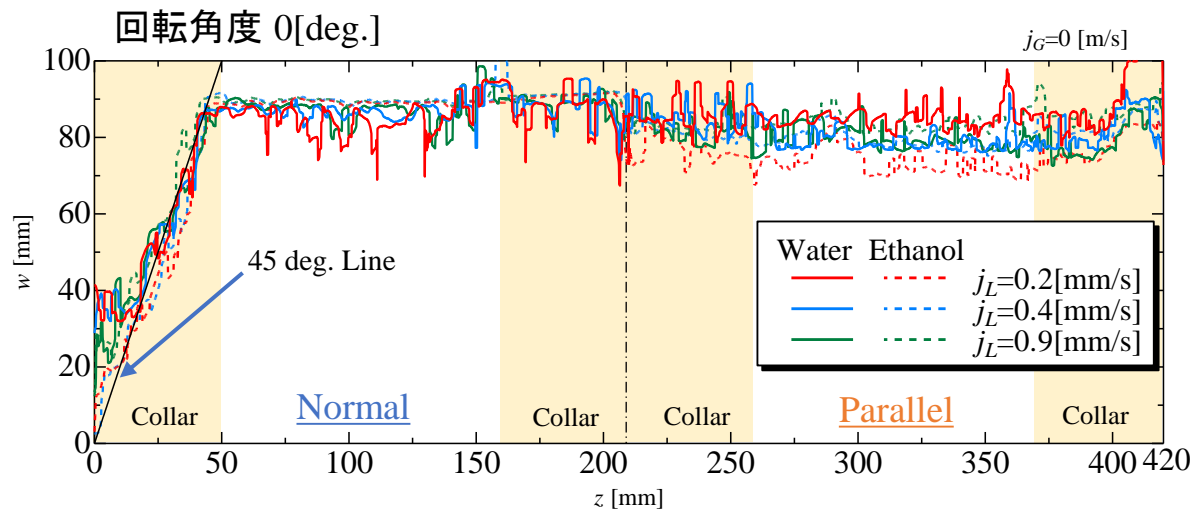
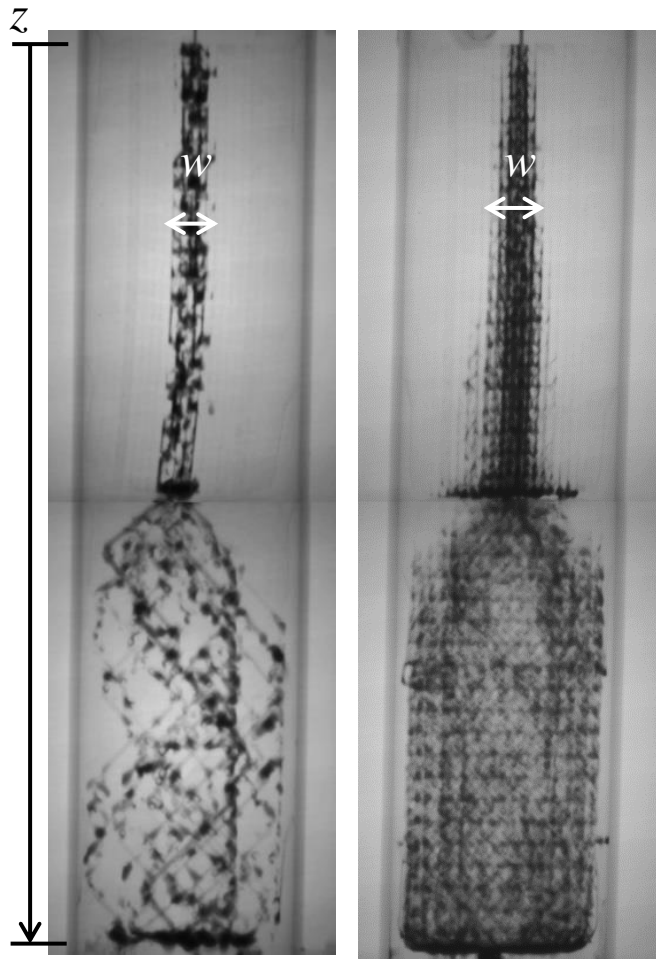
回転角度 0[deg.]



実験結果 -液分配特性評価-

各位置における液幅

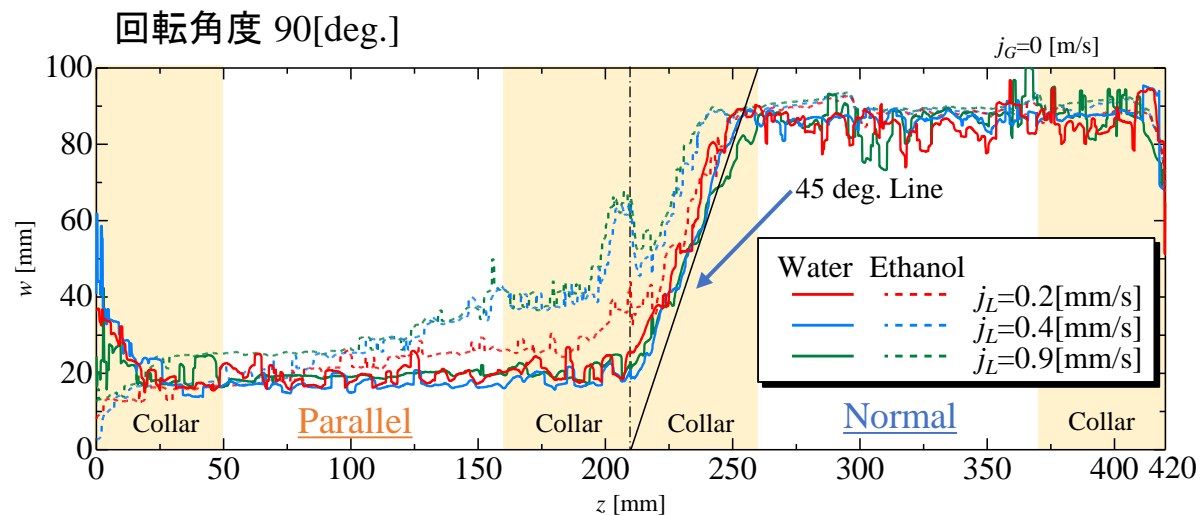
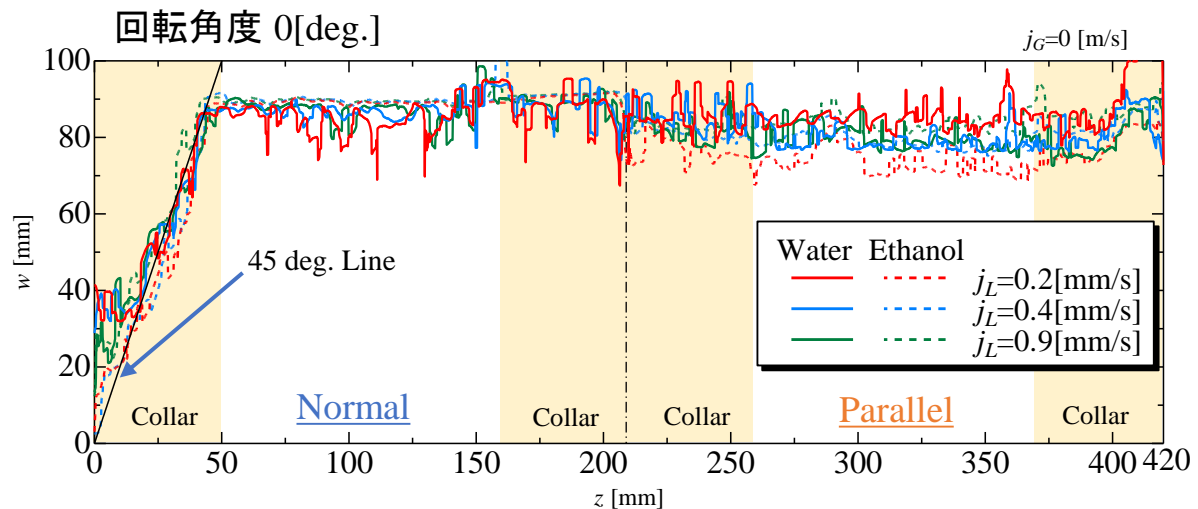
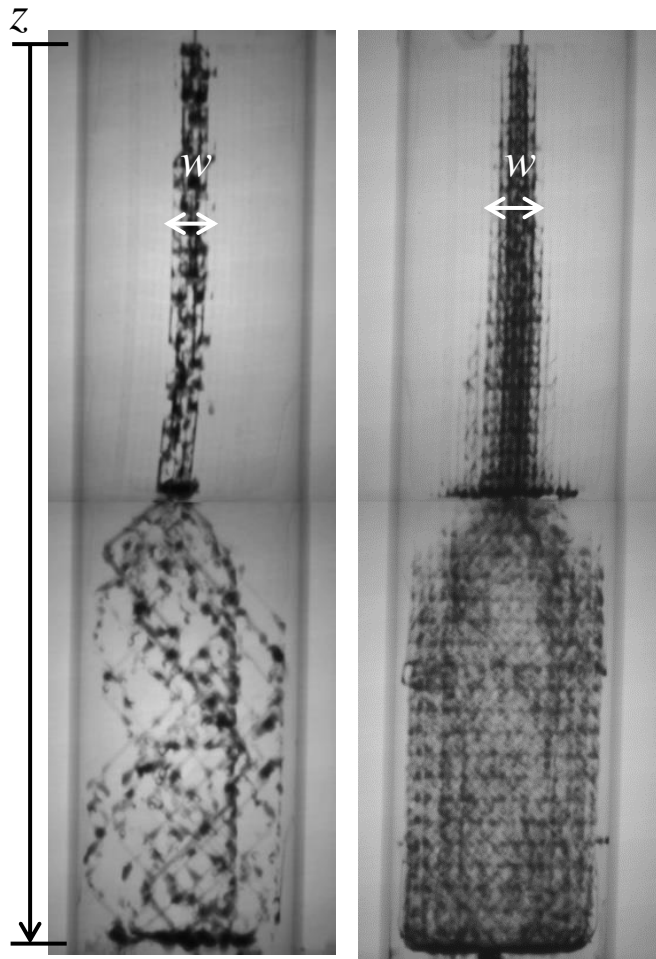
回転角度 90[deg.]



実験結果 -液分配特性評価-

各位置における液幅

回転角度 90[deg.]



☞ 各充填物上部ではコルゲート加工による液分配

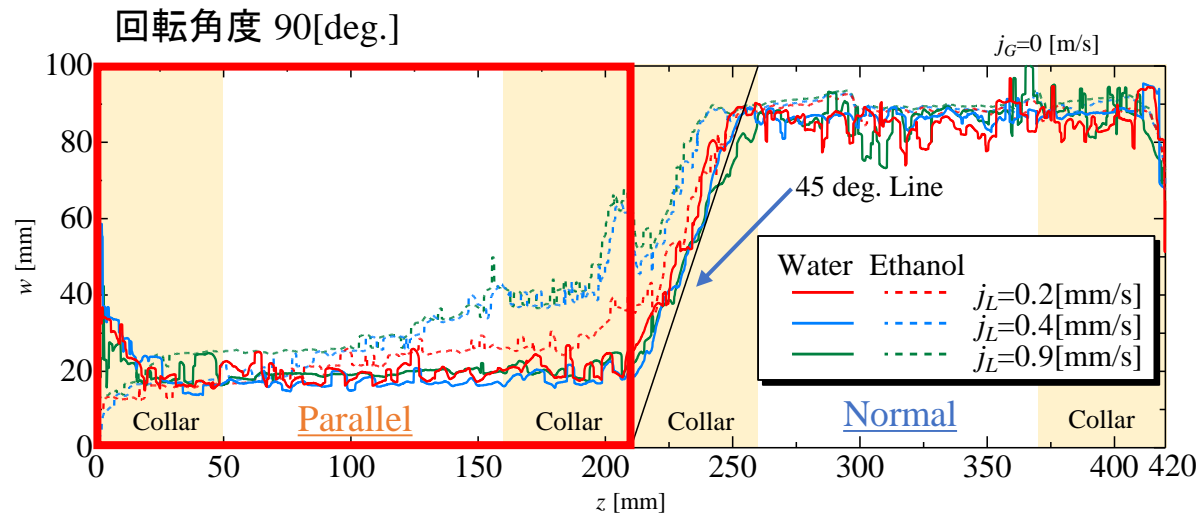
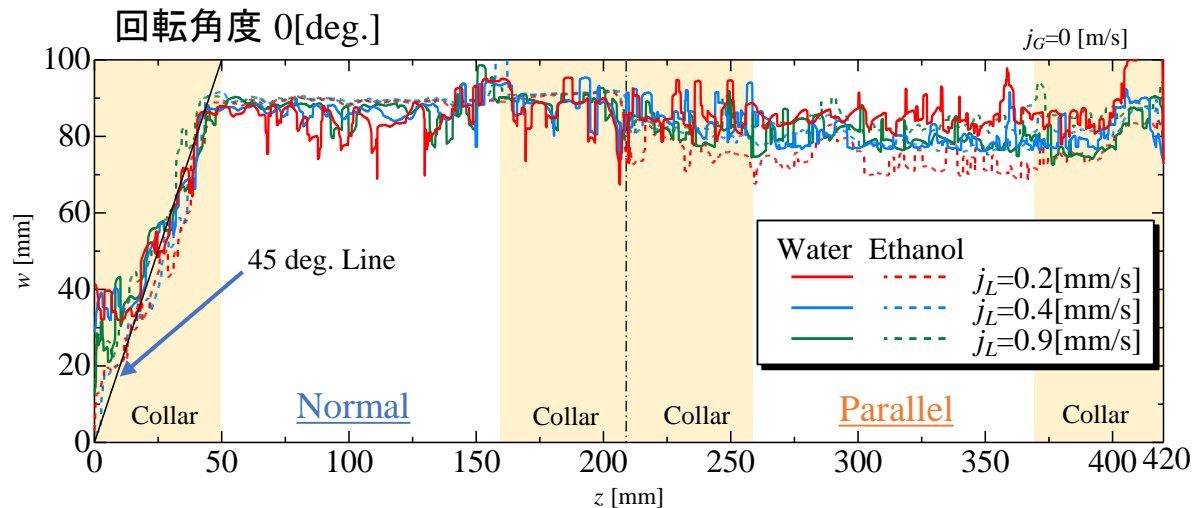
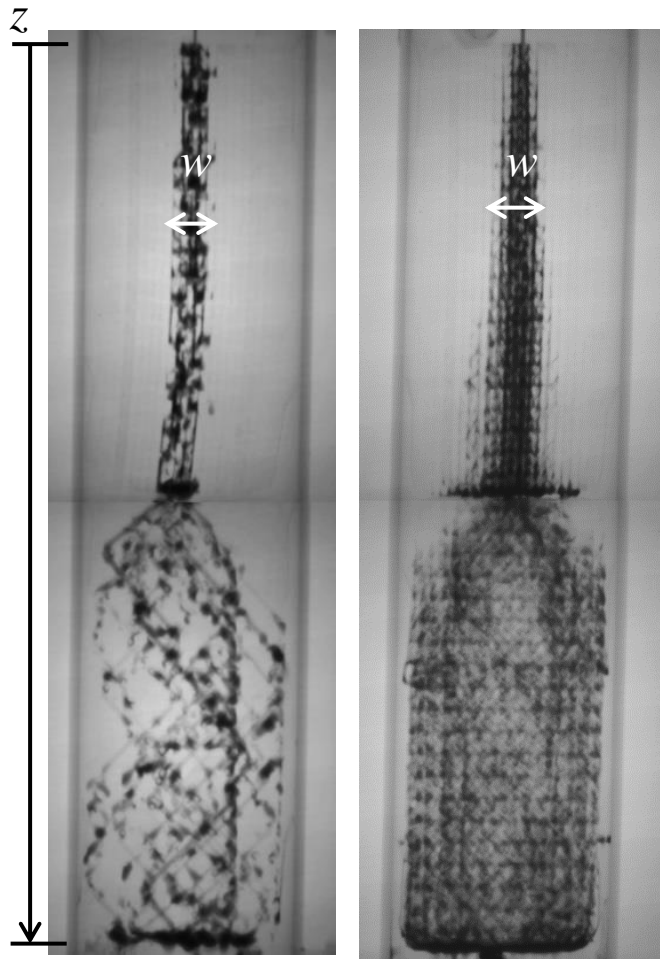
☞ 同時にエタノールの場合パーフォレートによる分配

実験結果 -液分配特性評価-



各位置における液幅

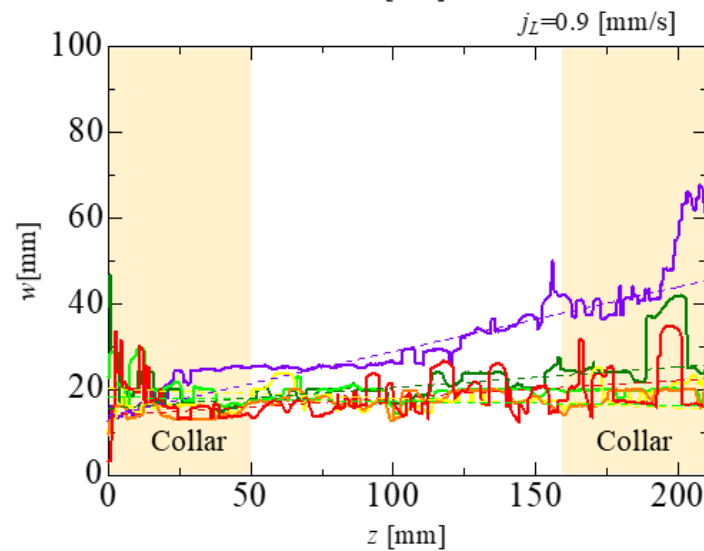
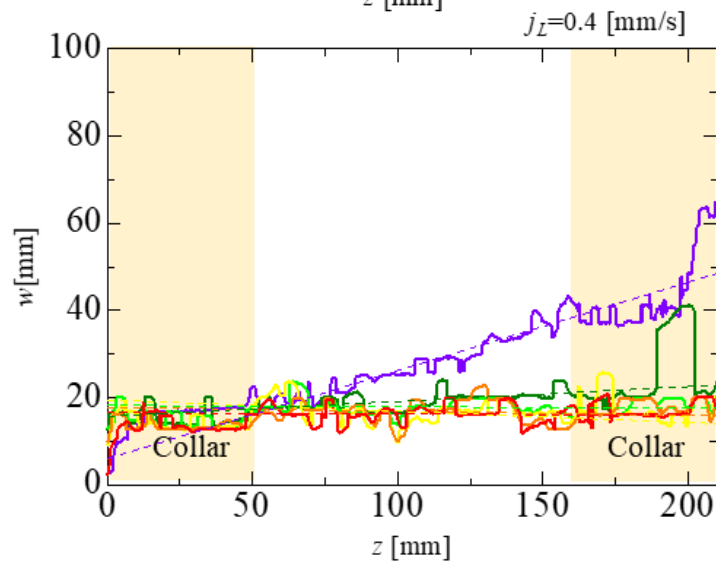
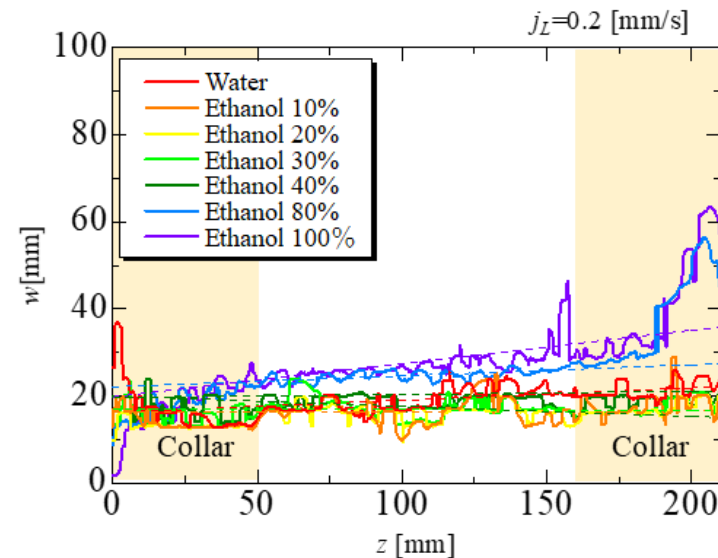
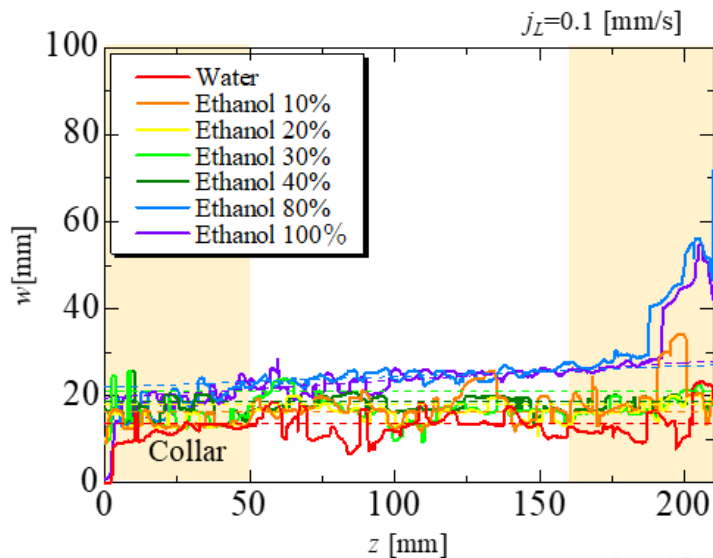
回転角度 90[deg.]



☞ 各充填物上部ではコルゲート加工による液分配

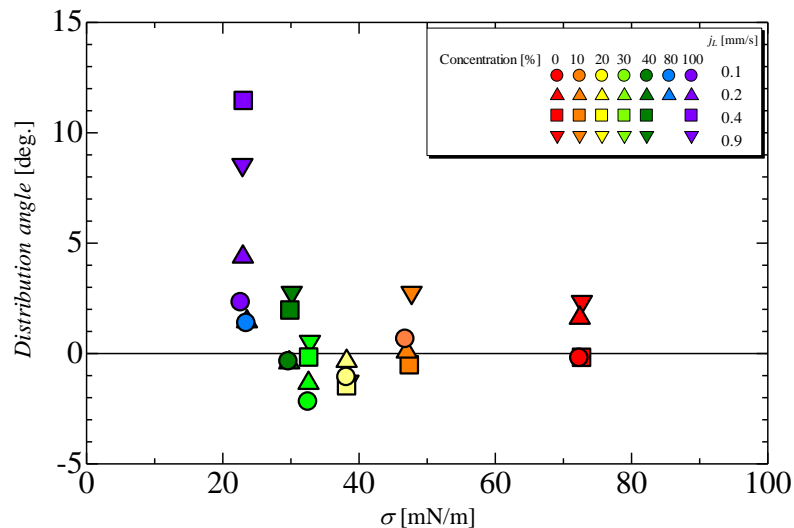
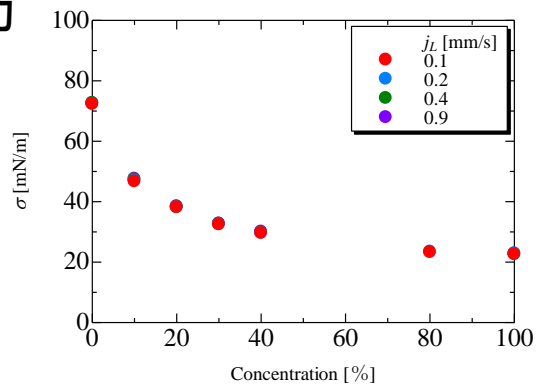
☞ 同時にエタノールの場合パーフォレートによる分配

パーフォレート液分配特性

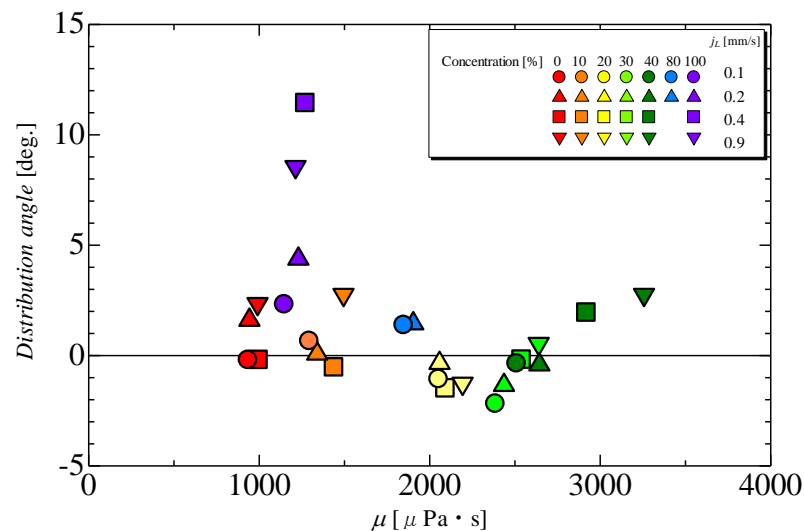
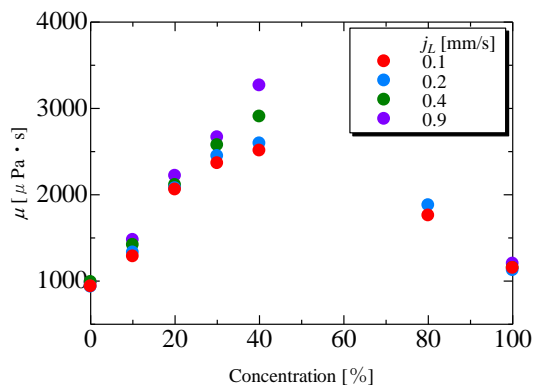


パーフォレート液分配特性

表面張力

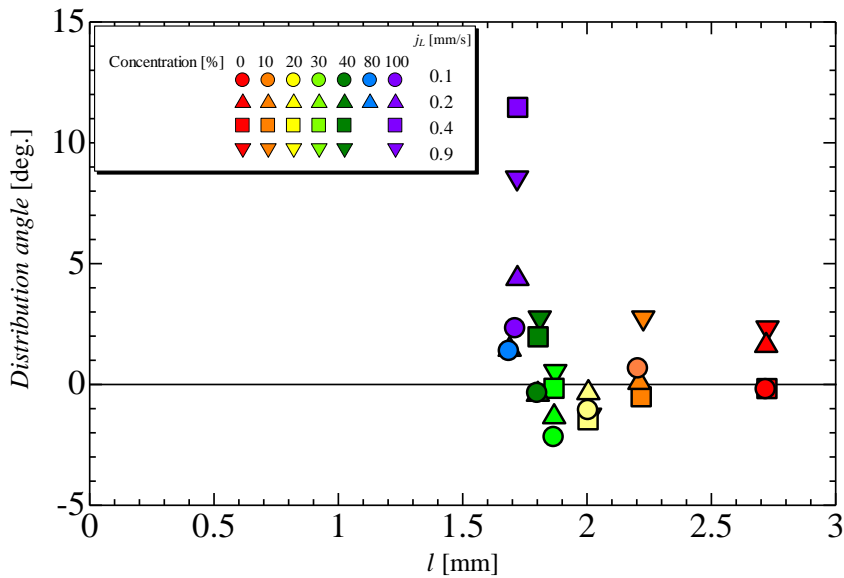


粘度

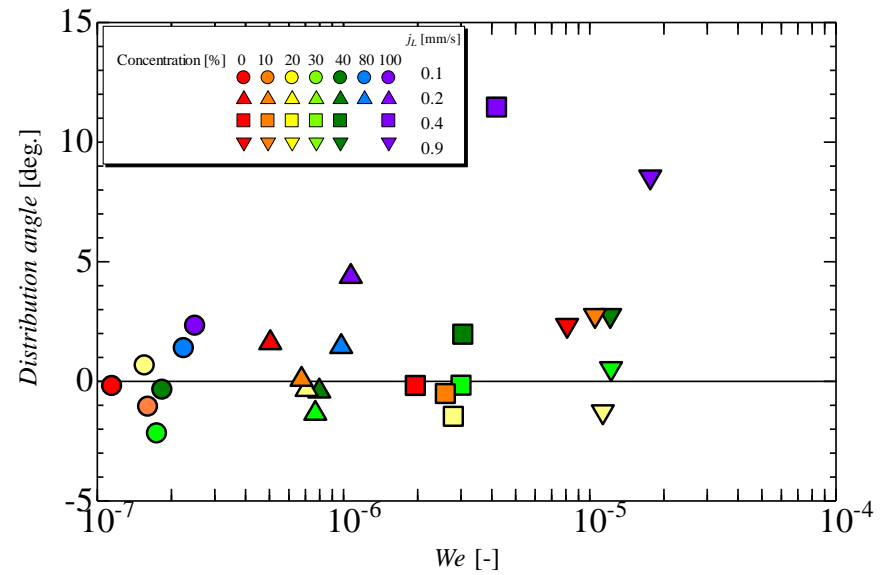


パーフォレート液分配特性

キャピラリ長 $l = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}$

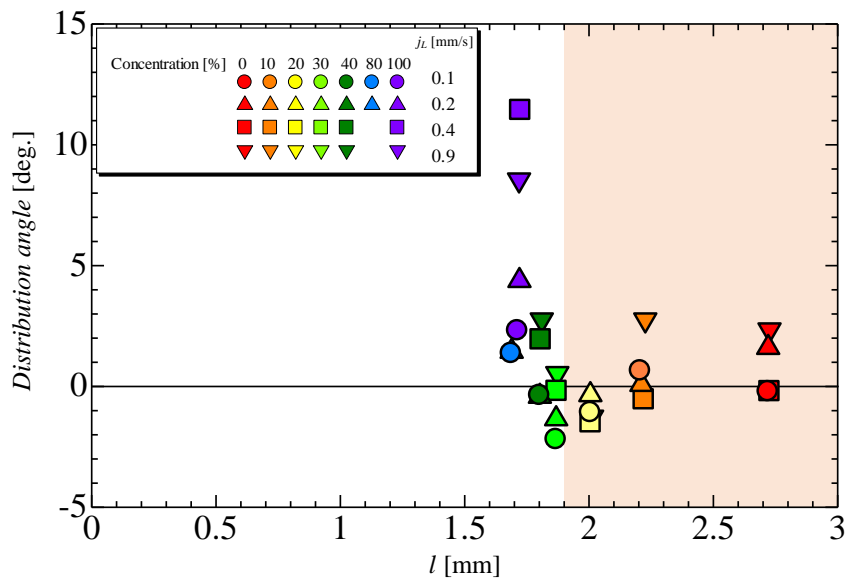


ウェーバー数: $We = \frac{\rho j_L \delta N^2}{\sigma}$

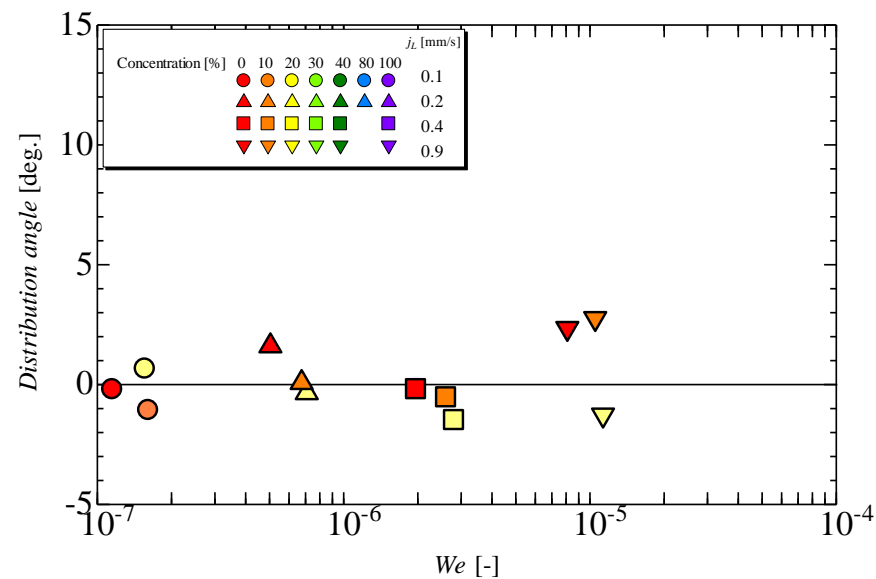


パーフォレート液分配特性

$$\text{キャピラリ長 } l = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}$$

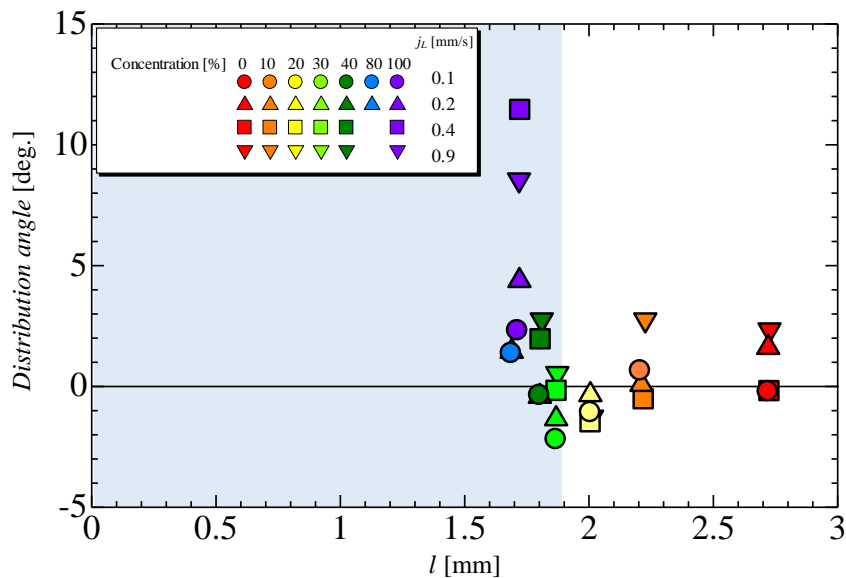


$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta_N^2}{\sigma}$$

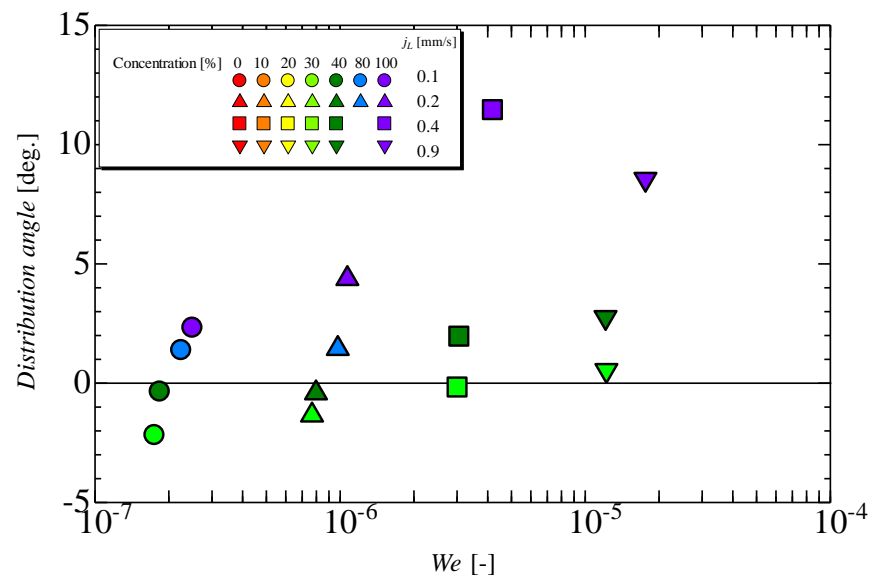


パーフォレート液分配特性

$$\text{キャピラリ長 } l = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}$$



$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta_N^2}{\sigma}$$



実験結果 -CT画像-

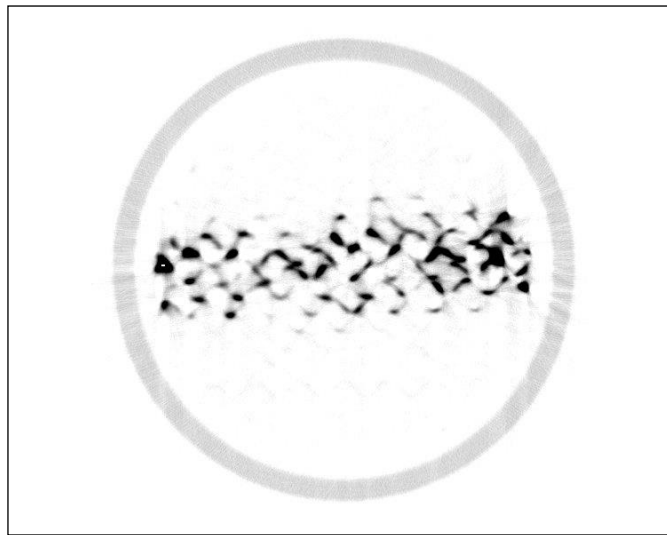


CT断面画像 $j_L = 0.4$ [mm/s] $j_G = 0$ [m/s]

水

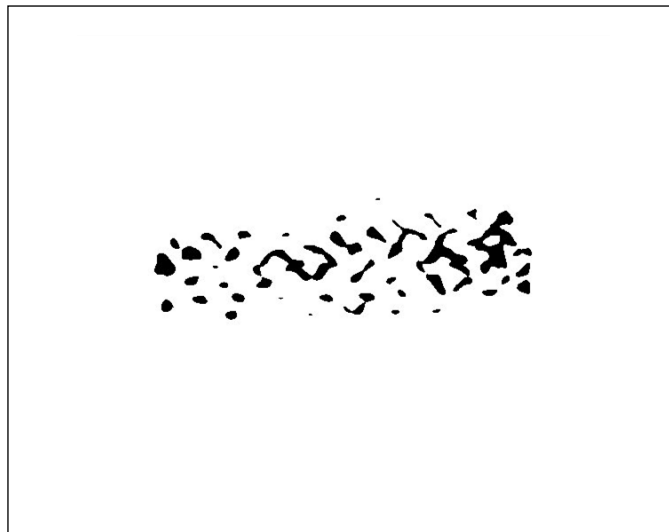
エタノール

液到達領域



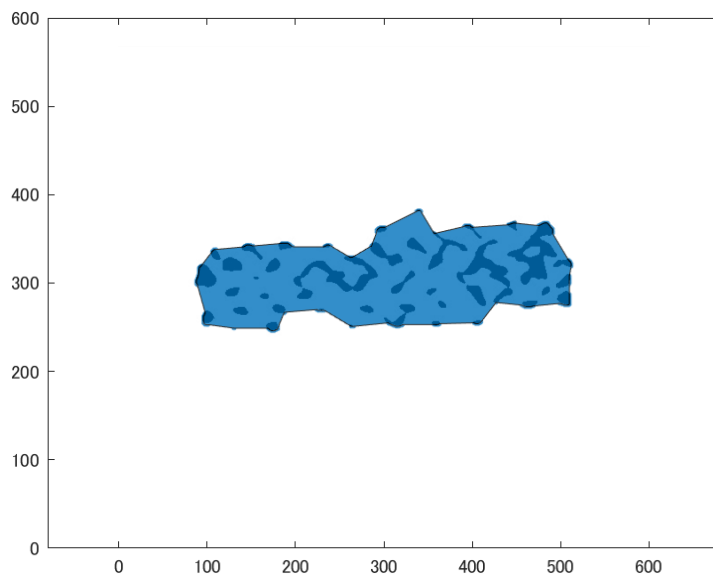
元画像

液到達領域



二値化

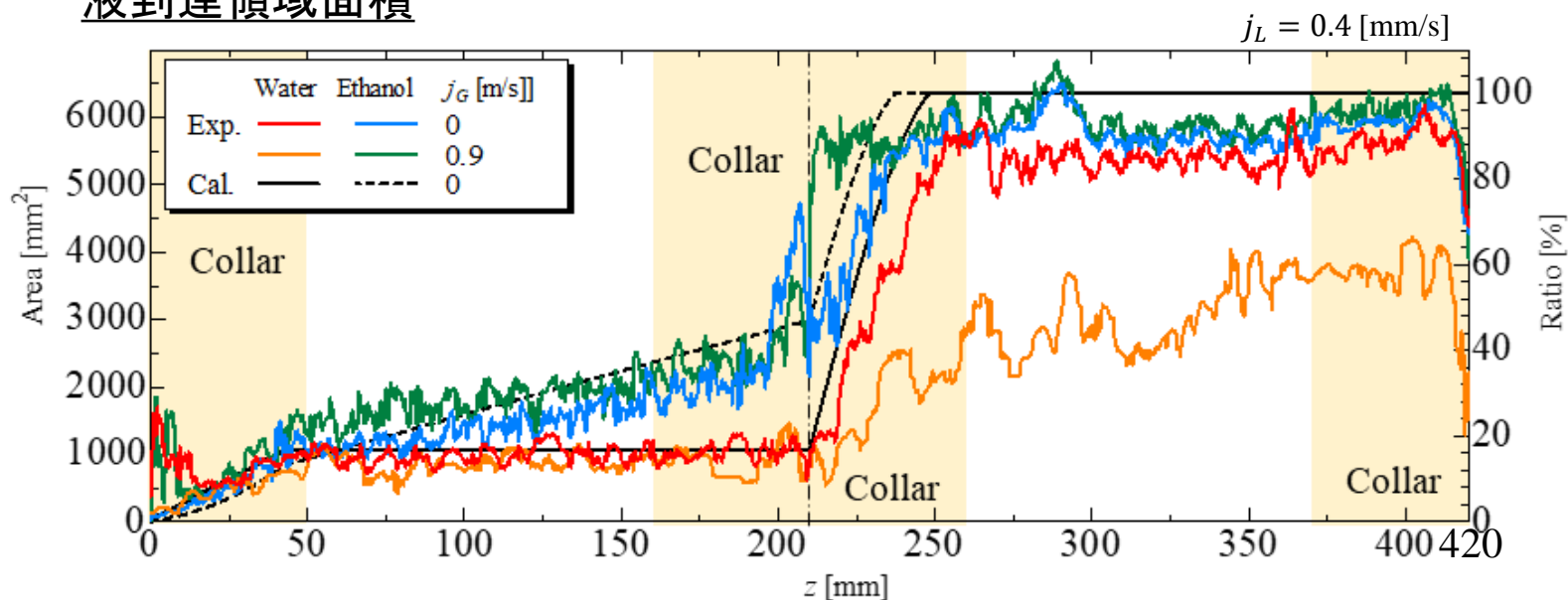
液到達領域



凸包絡処理

- ✓ MATLAB内 Boundary関数で最遠部を包括

液到達領域面積

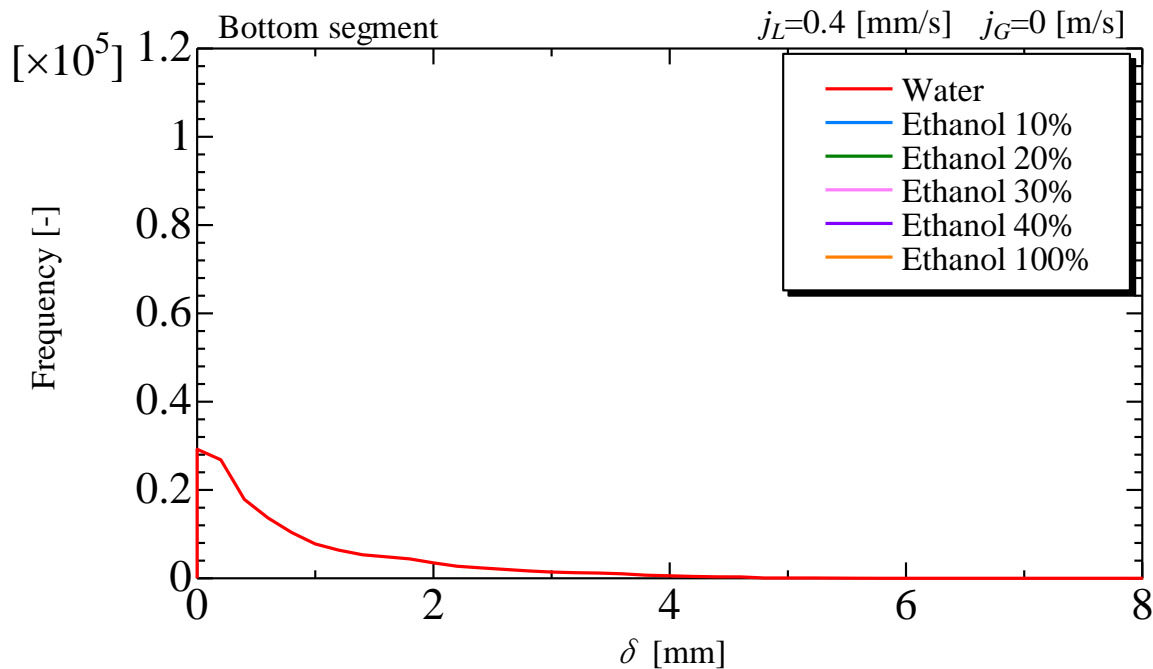
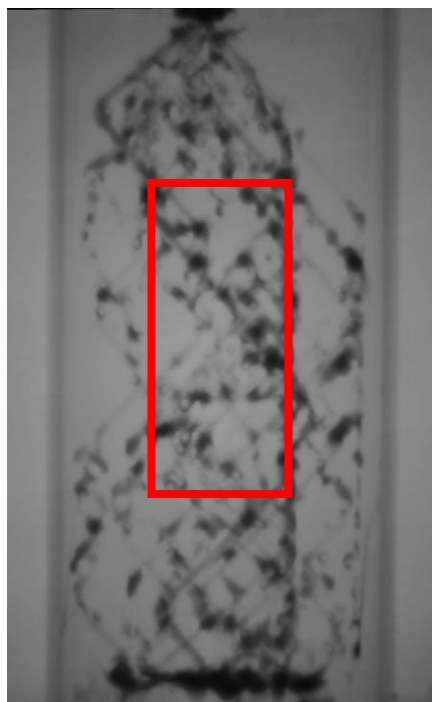


液透過厚さヒストグラム

検査範囲

下段 [Normal](#)

水

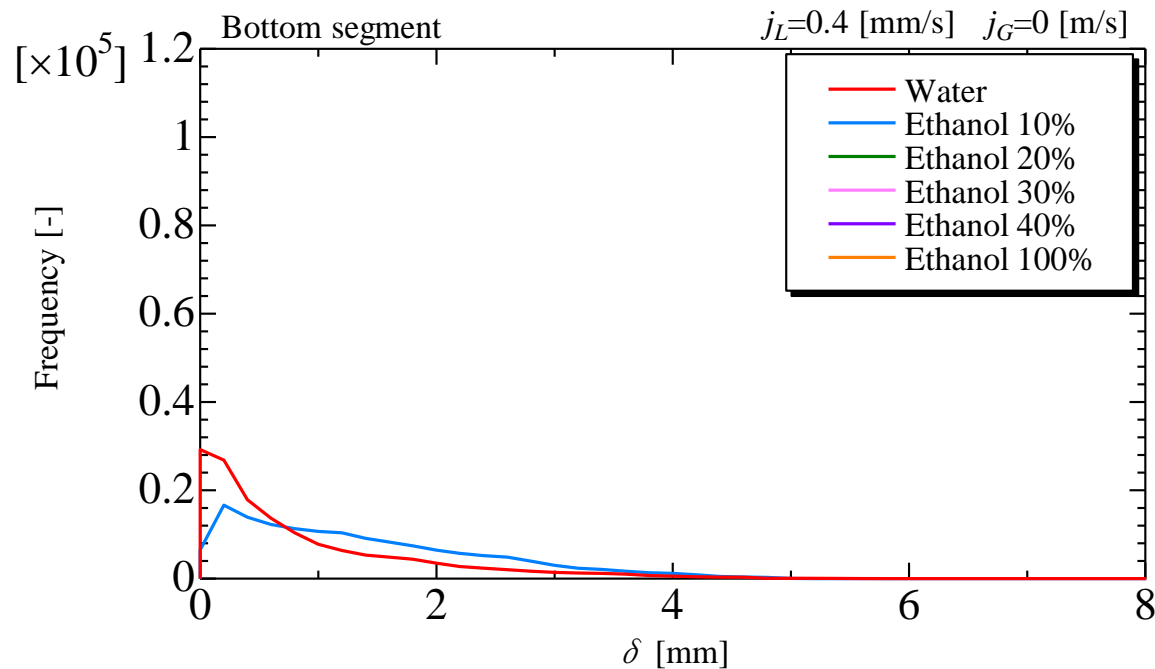
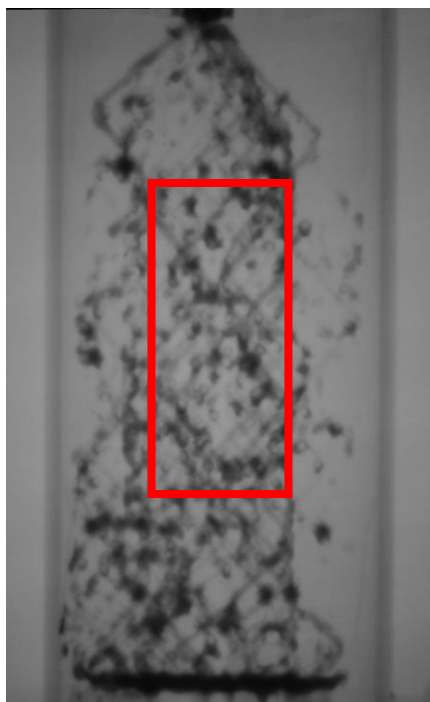


液透過厚さヒストグラム

検査範囲

下段 [Normal](#)

エタノール水溶液10%

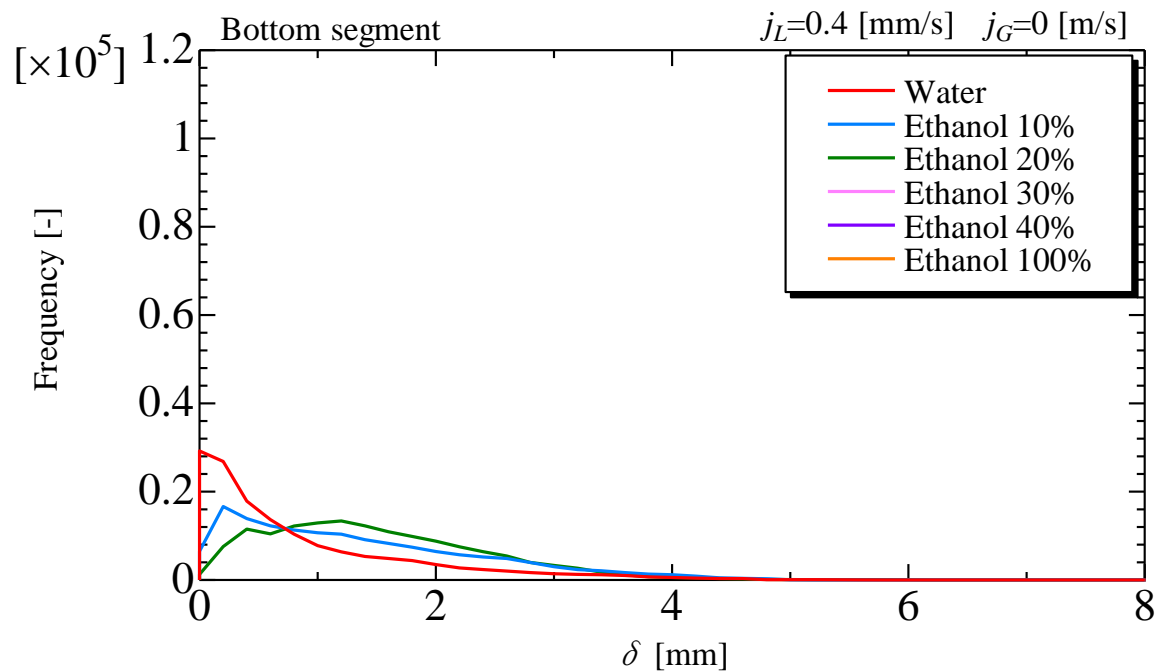
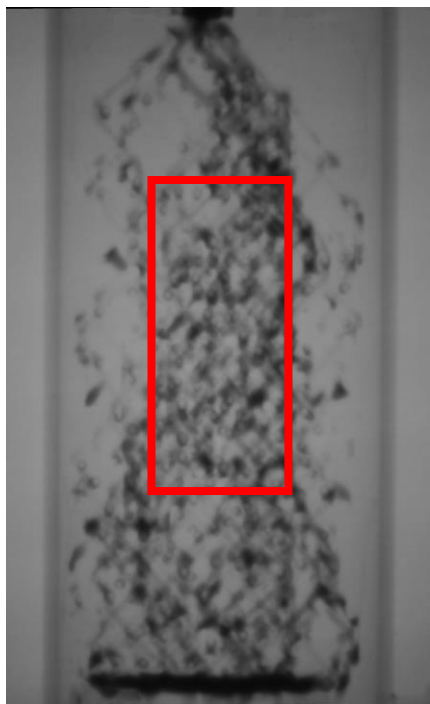


液透過厚さヒストグラム

検査範囲

下段 [Normal](#)

エタノール水溶液20%

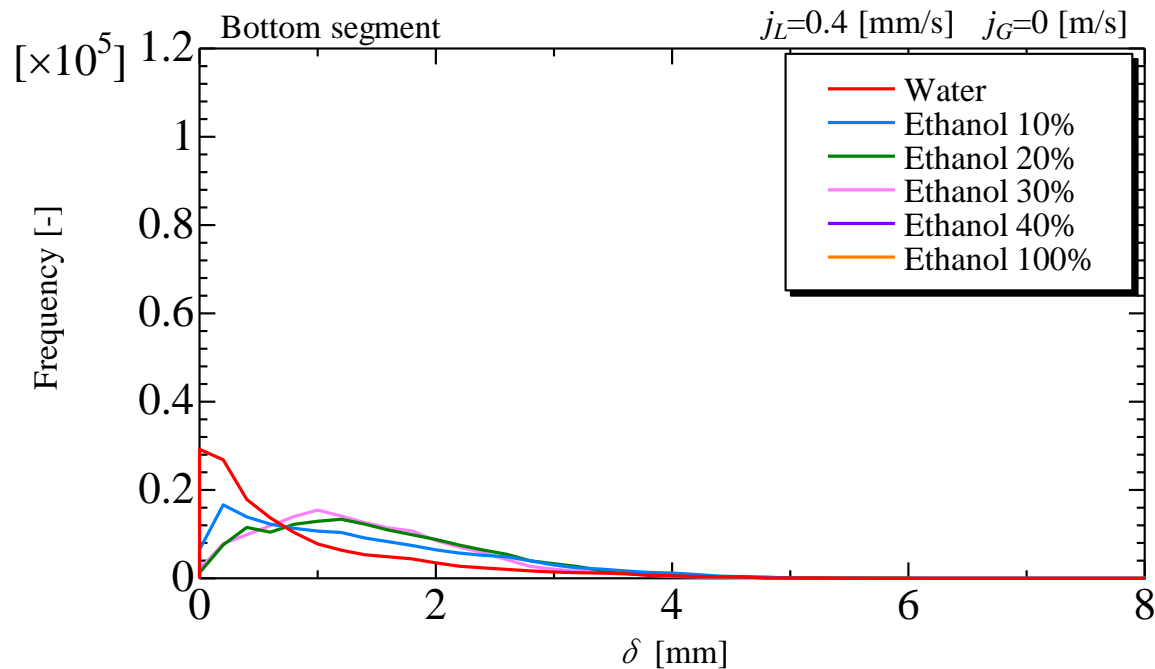
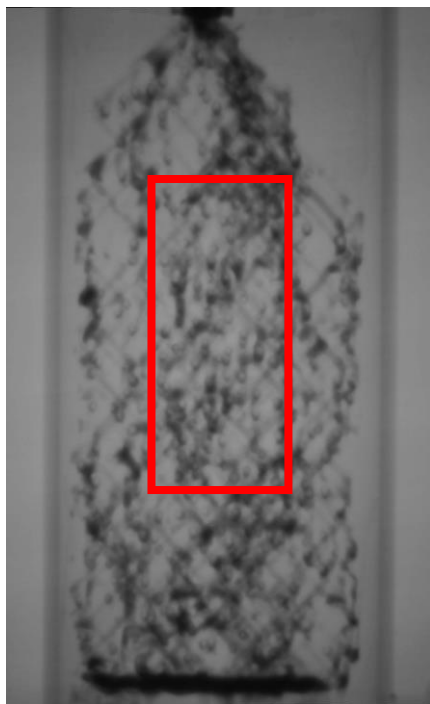


液透過厚さヒストグラム

検査範囲

下段 [Normal](#)

エタノール水溶液30%

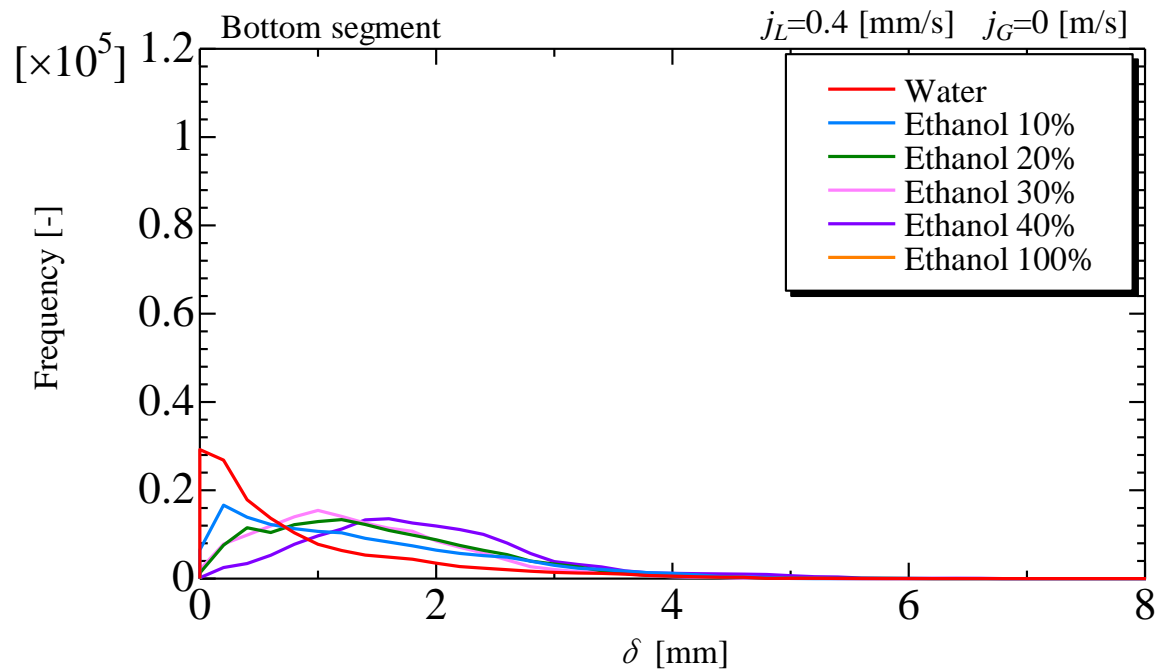


液透過厚さヒストグラム

検査範囲

下段 [Normal](#)

エタノール水溶液40%

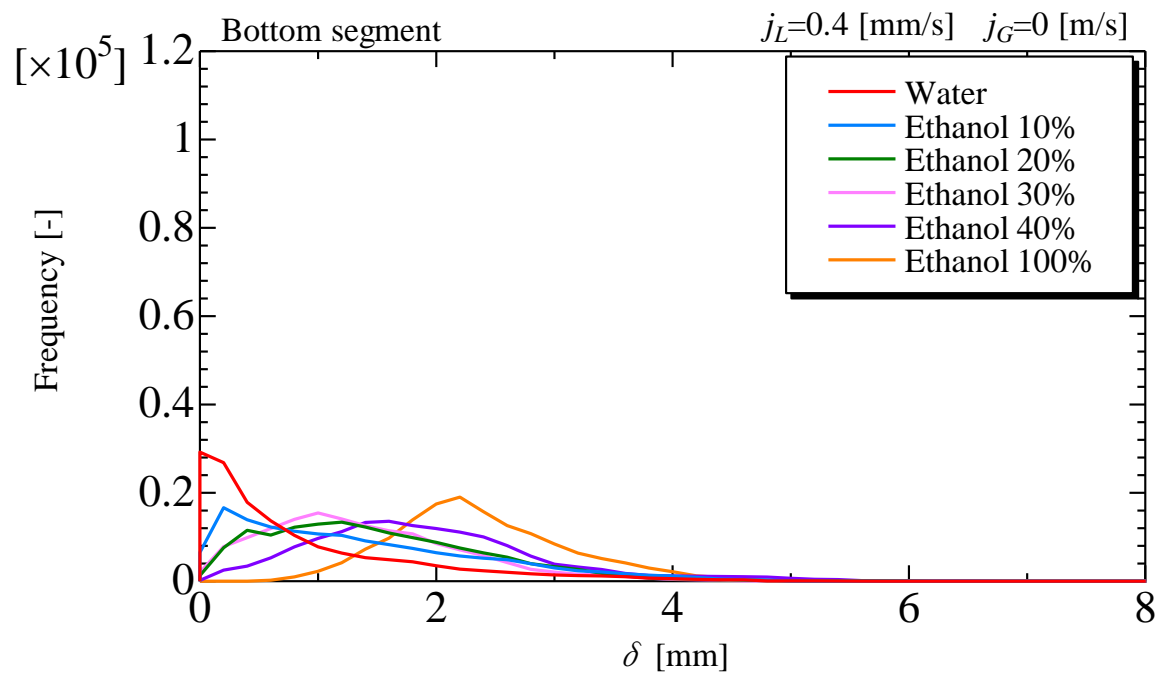
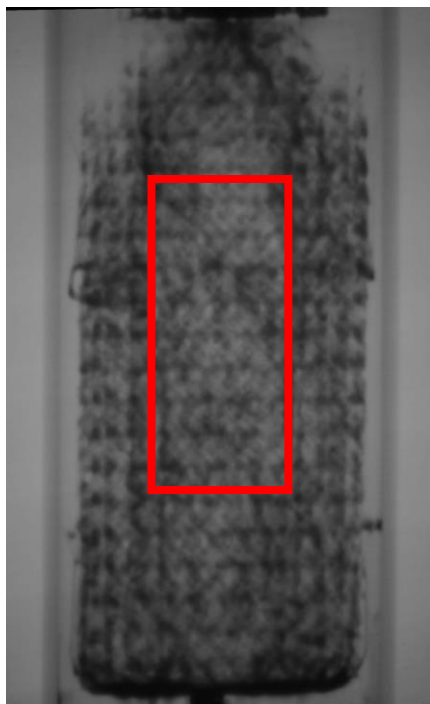


液透過厚さヒストグラム

検査範囲

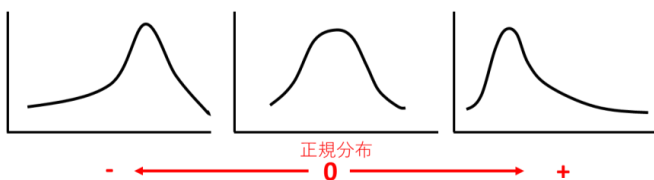
下段 [Normal](#)

エタノール100%

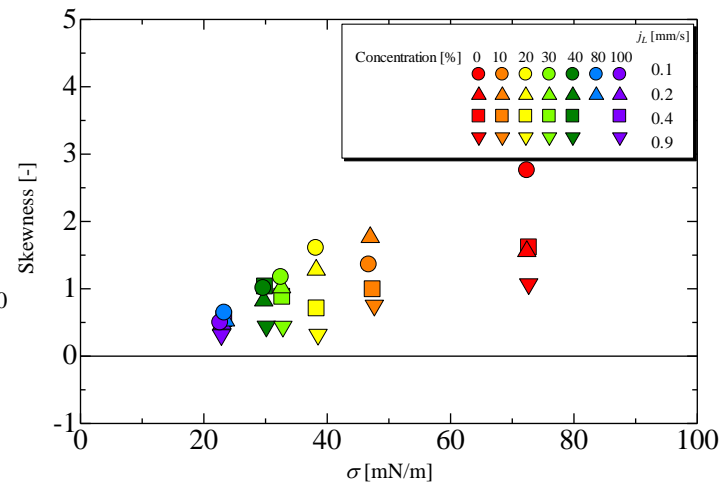
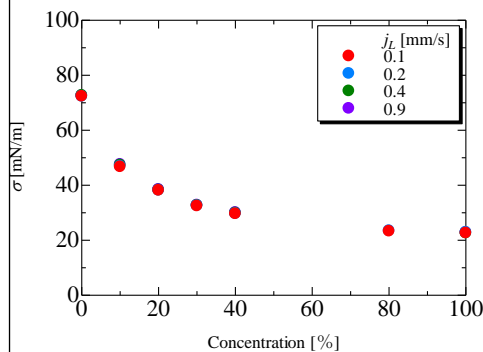


液透過厚さ歪度

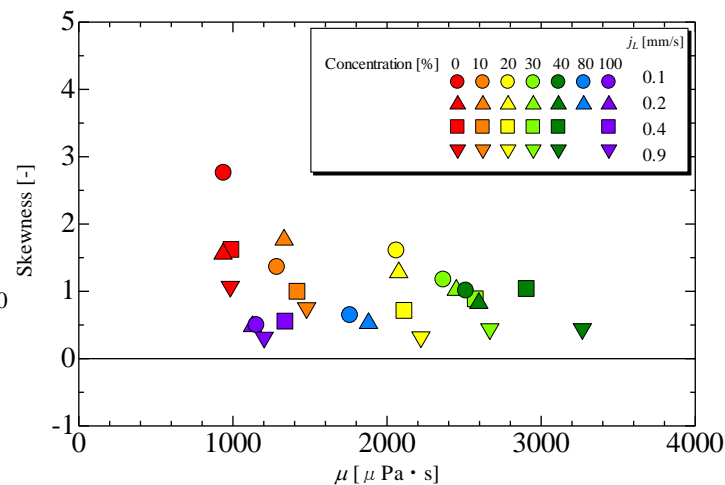
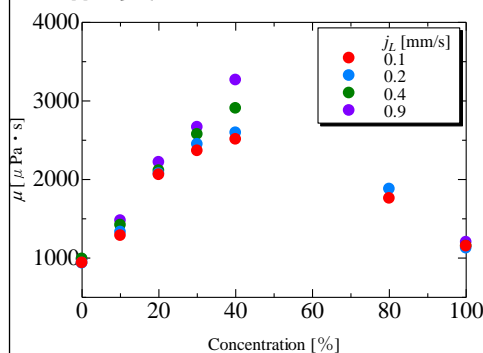
$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$



表面張力



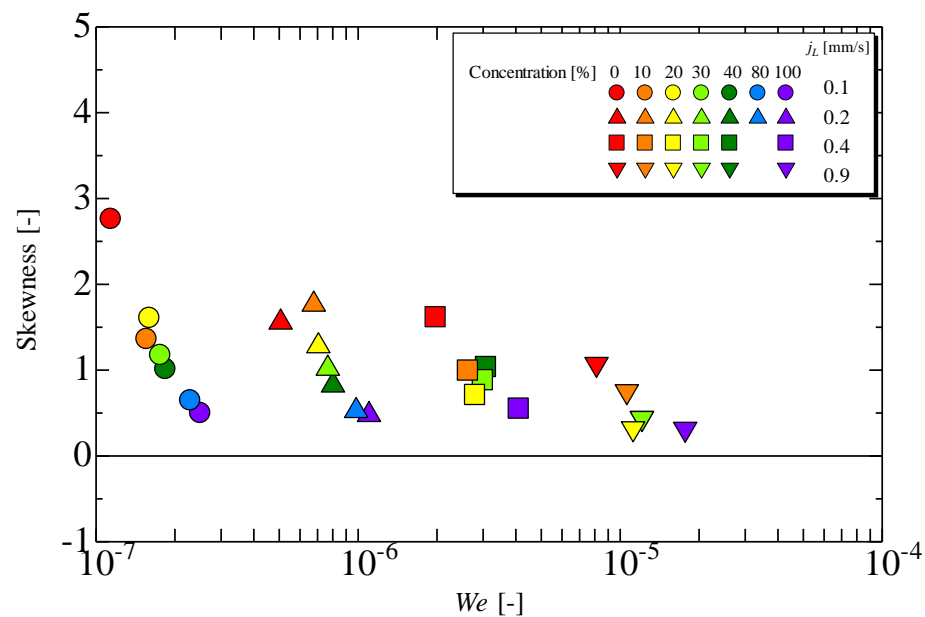
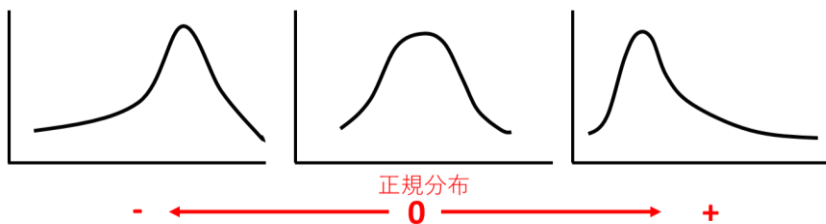
粘度



液透過厚さ歪度

$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

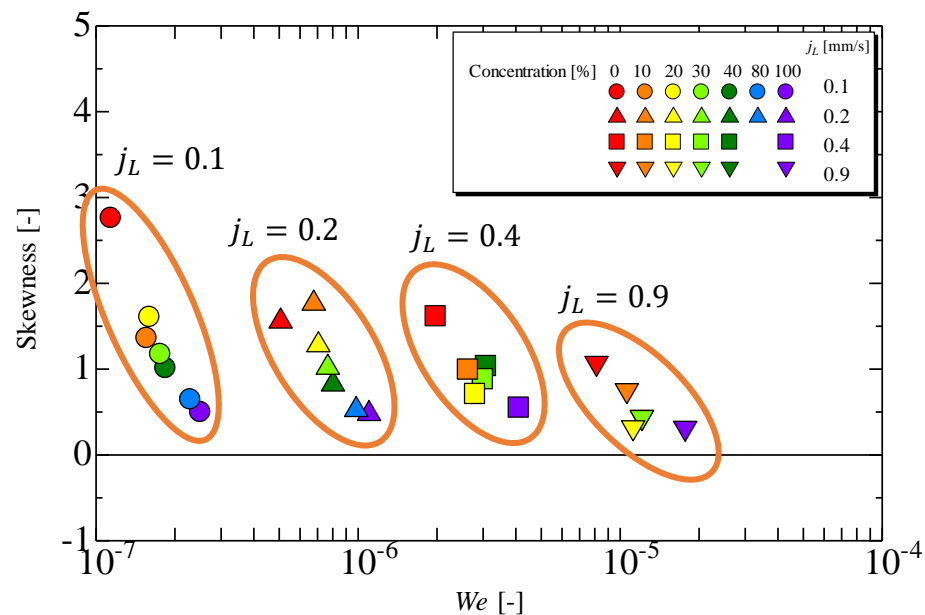
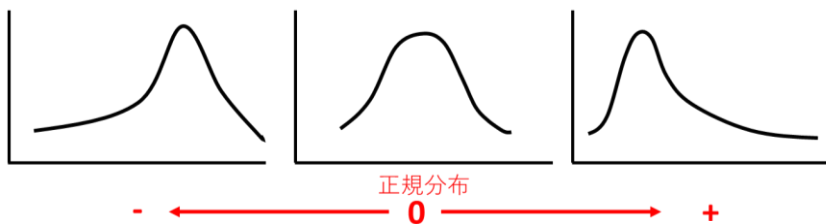
$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta N^2}{\sigma}$$



液透過厚さ歪度

$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

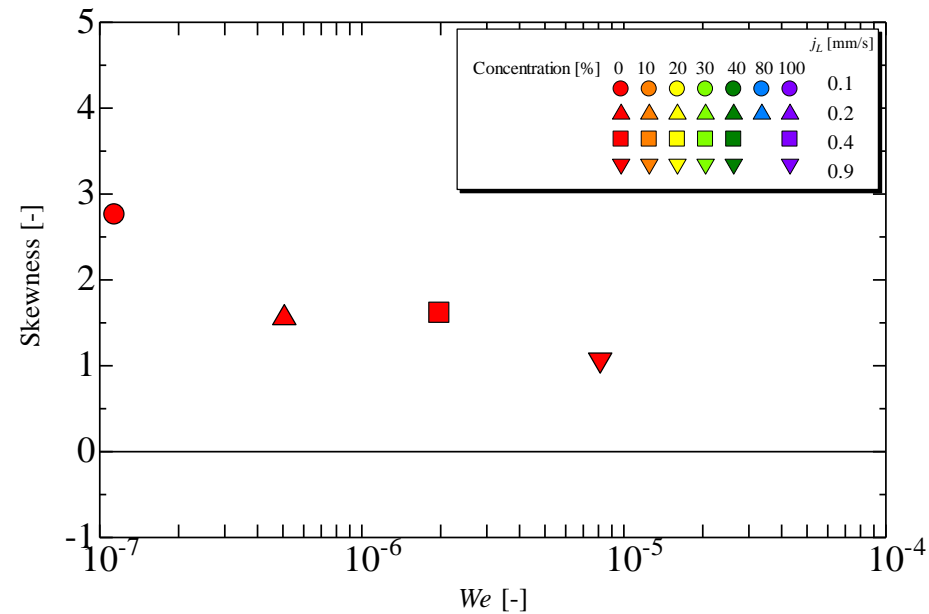
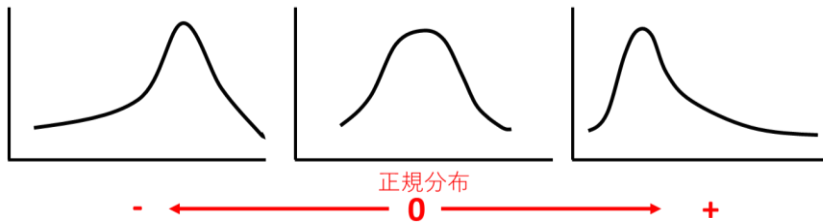
$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta_N^2}{\sigma}$$



液透過厚さ歪度

$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

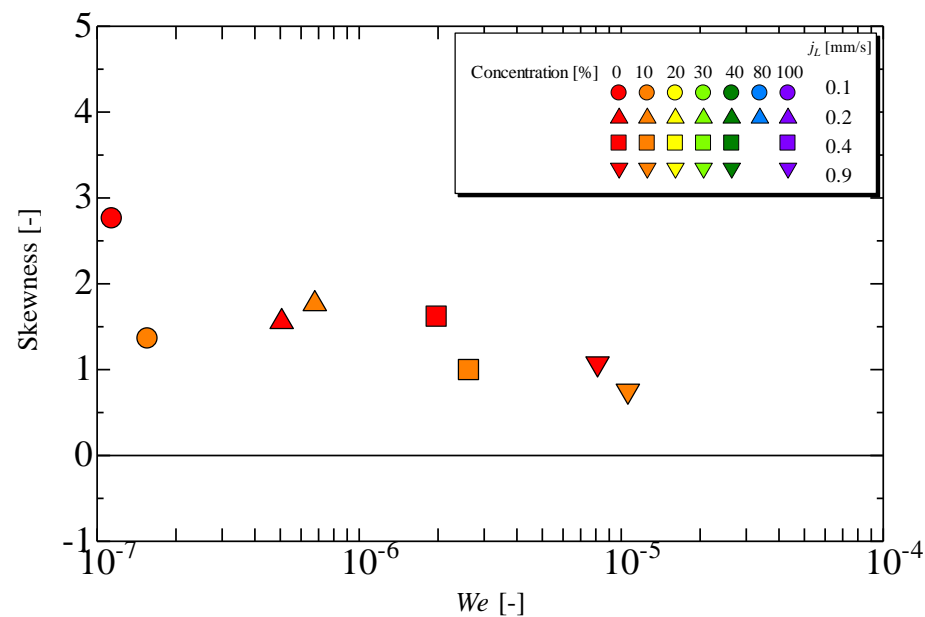
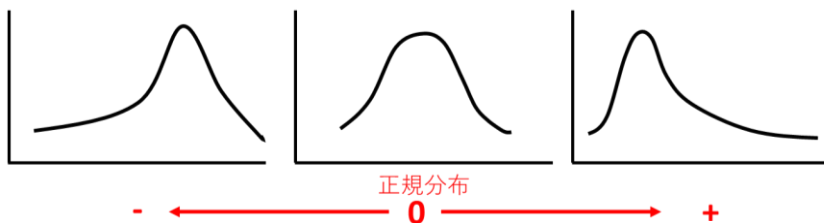
$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta N^2}{\sigma}$$



液透過厚さ歪度

$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

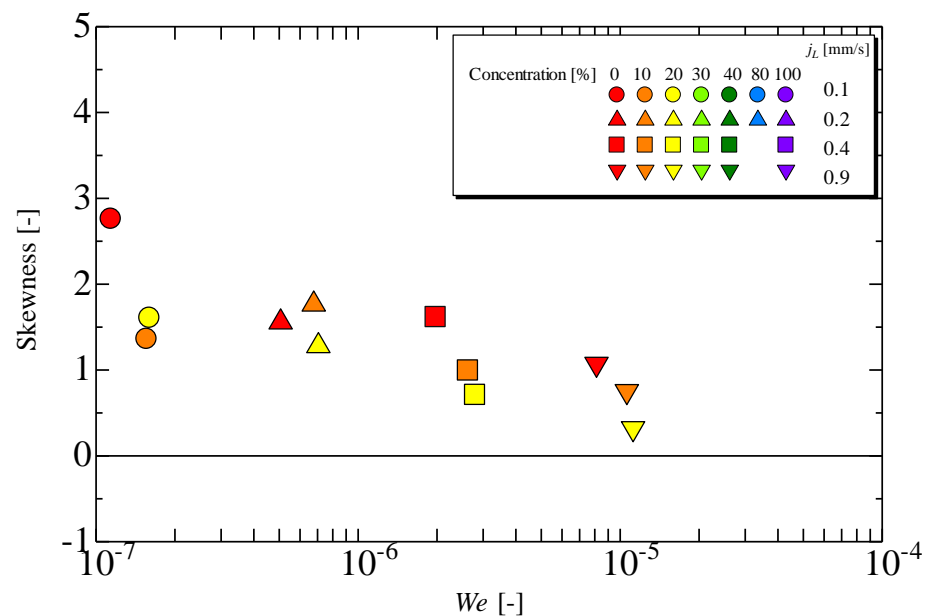
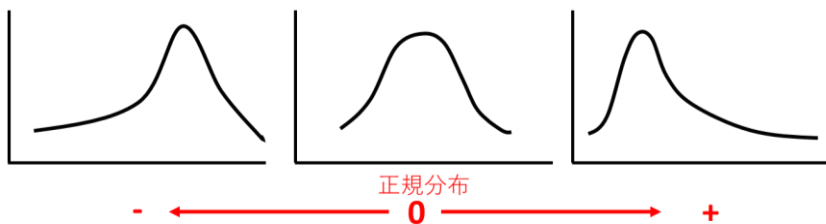
$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta N^2}{\sigma}$$



液透過厚さ歪度

$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

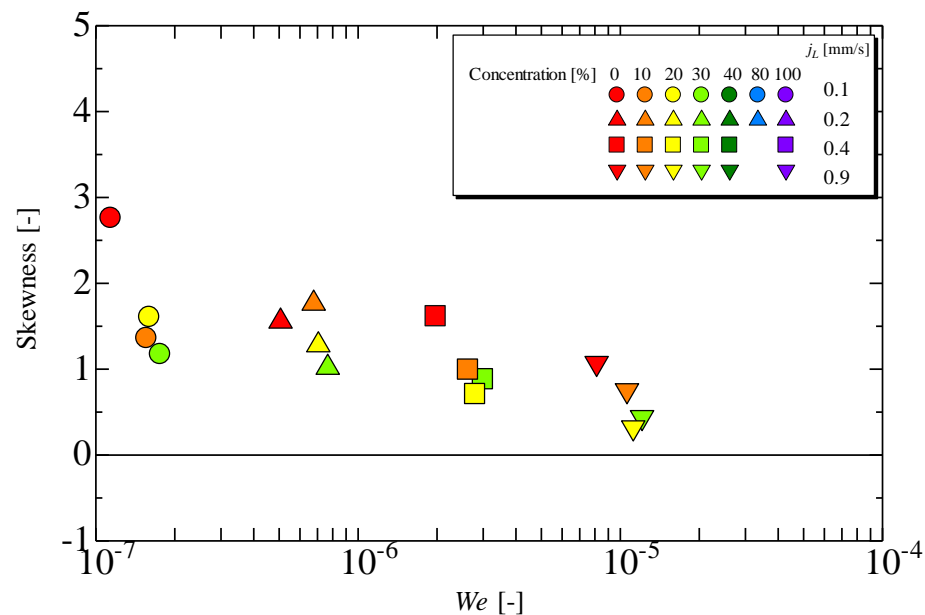
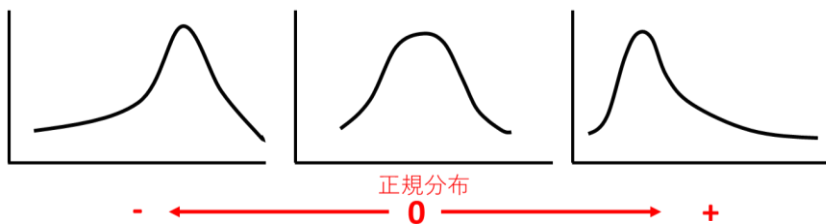
$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta N^2}{\sigma}$$



液透過厚さ歪度

$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

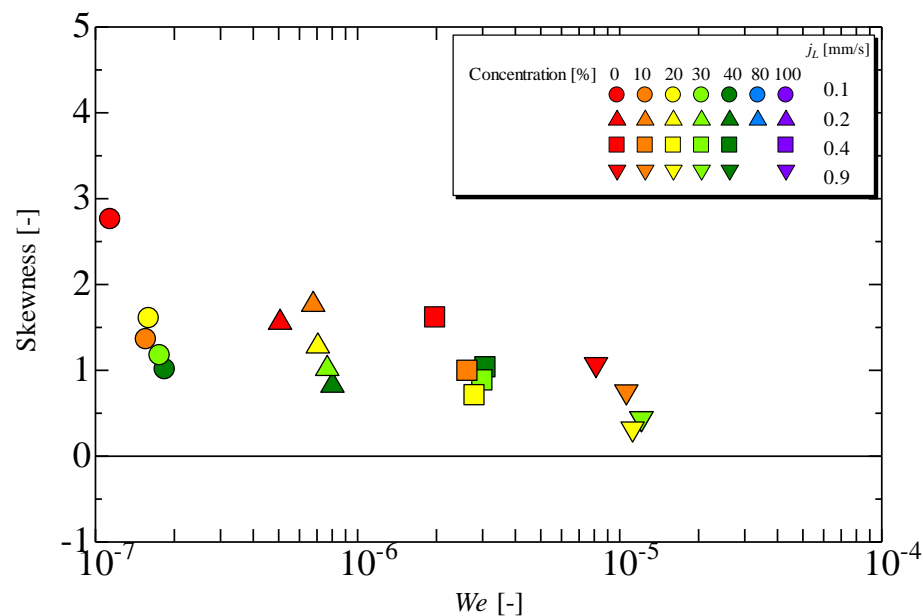
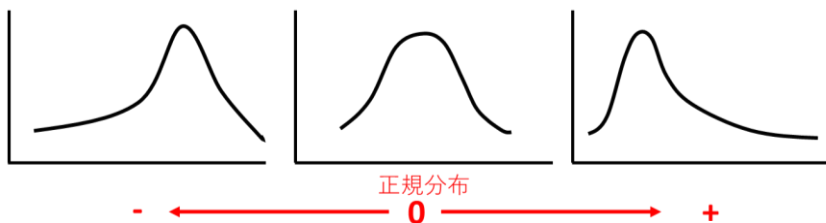
$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta N^2}{\sigma}$$



液透過厚さ歪度

$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

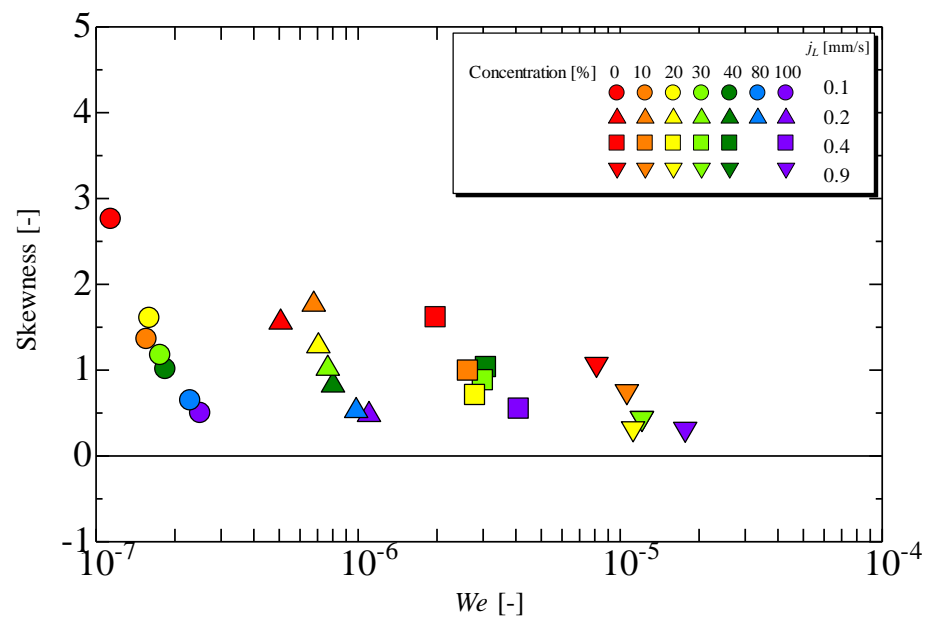
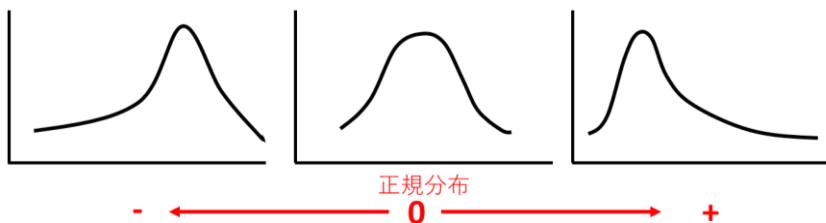
$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta_N^2}{\sigma}$$



液透過厚さ歪度

$$\text{歪度} : \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

$$\text{ウェーバー数} : We = \frac{\rho j_L \delta N^2}{\sigma}$$



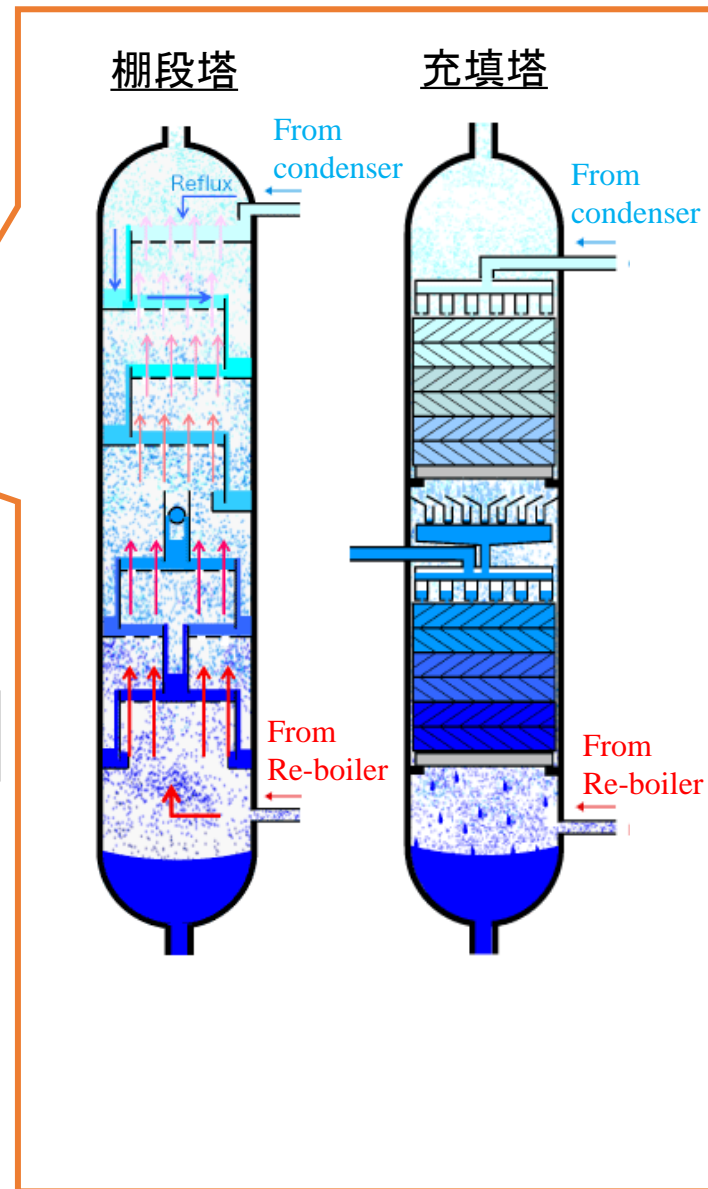
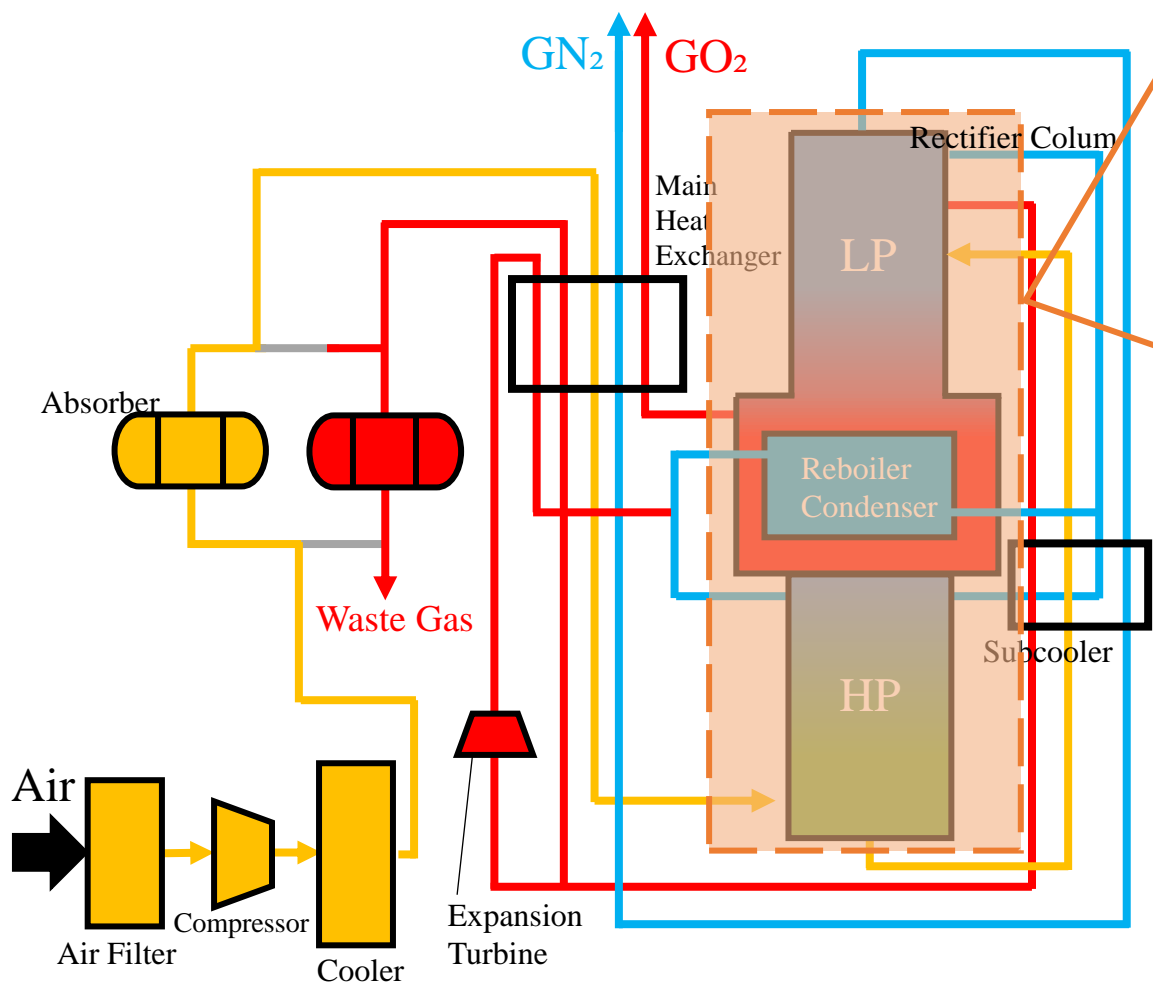
規則充填物内部における液分配，流動状態の詳細把握を目的として，模擬充填塔を中性子ラジオグラフィを用いて可視化し，CT再構成することで3次元的に分配、流動の評価を行うことを試みた。

- 充填物のシート面方向の液分配は主としてコルゲート構造により行われる。このため充填物上部での液拡散はコルゲート構造が形成する 45° ラインに沿って確認できる。
- 充填物シート間の液分配はパーフォレートを介して行われる。評価手法として液の存在幅を線形近似することで角度を算出し，キャピラリ長，We数で整理が可能と考えられる。
- 充填物表面の液の分布様相は，液透過厚さのヒストグラムで特徴が描画される。本系では歪度を用いた評価を行い、ウェーバー数により整理が可能であると考える。
- CT断面画像を利用した定量評価にはさらなるデータの拡充が必要であり，リブレットやパーフォレートの影響について，よりマイクロな視点での可視化を今後行う必要性も示された。

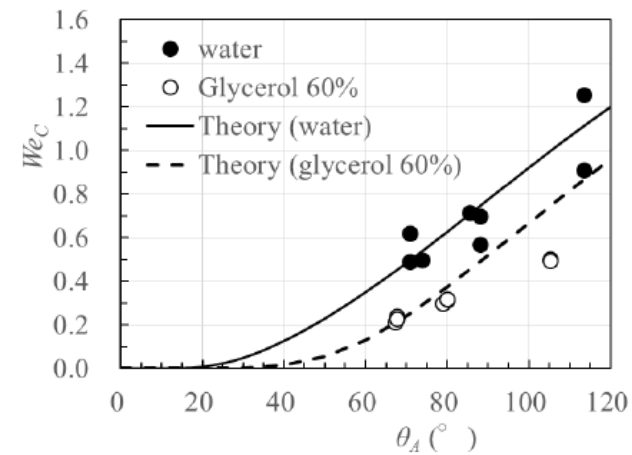
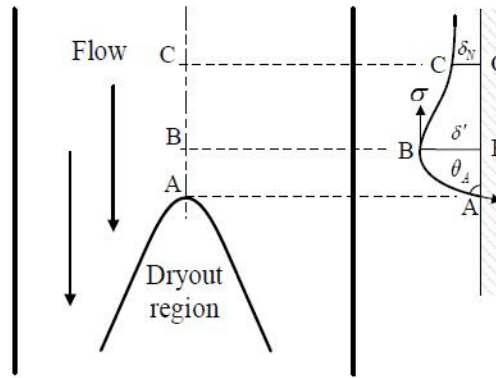
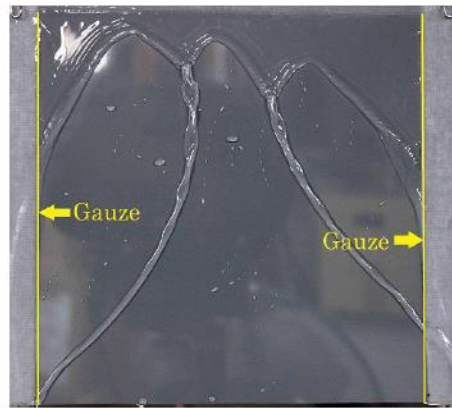


空気分離装置について

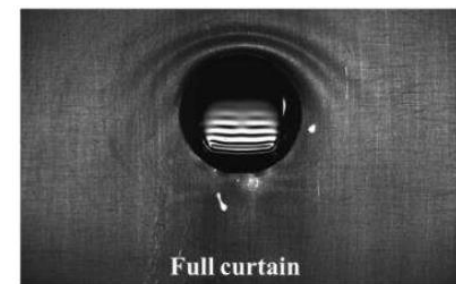
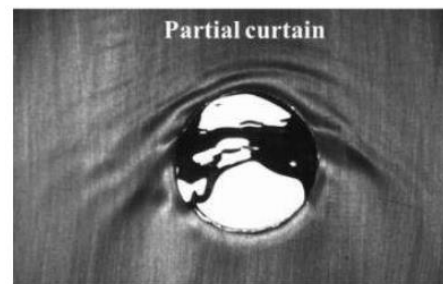
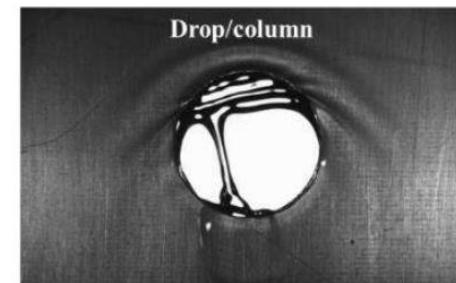
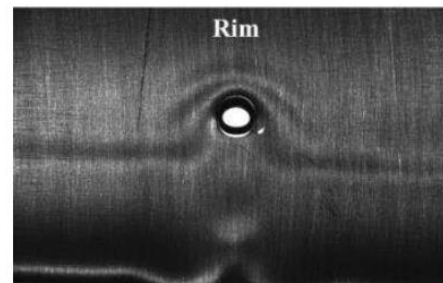
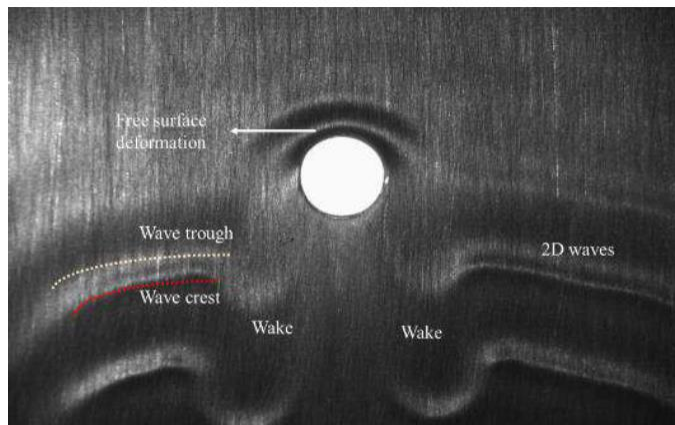
空気分離装置



パーフォレート



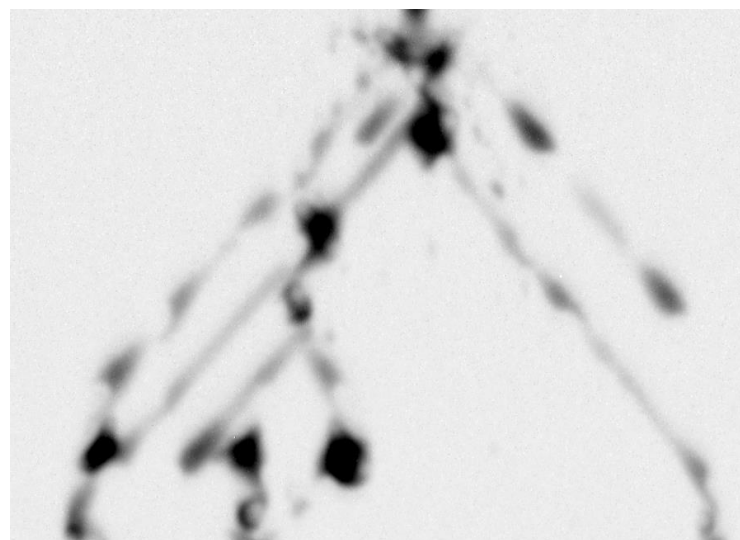
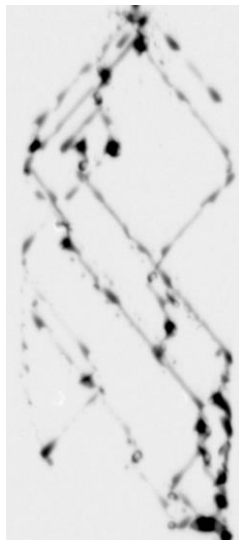
固体と液体のぬれの力学、加藤, 健司、2016



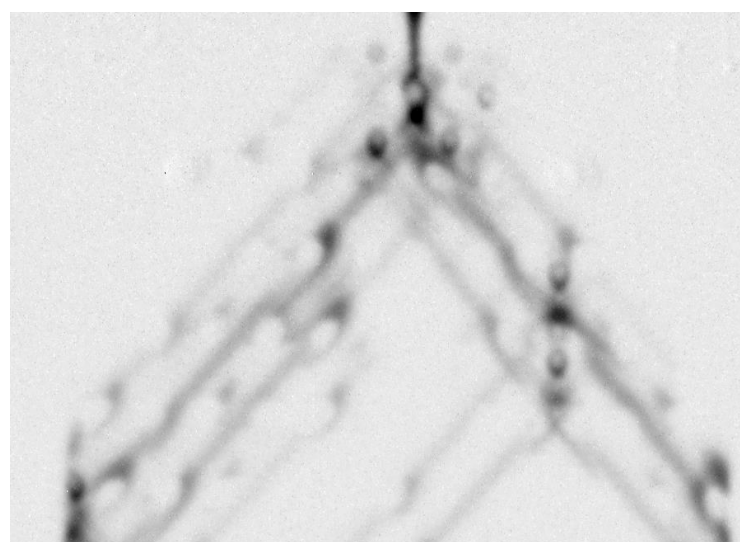
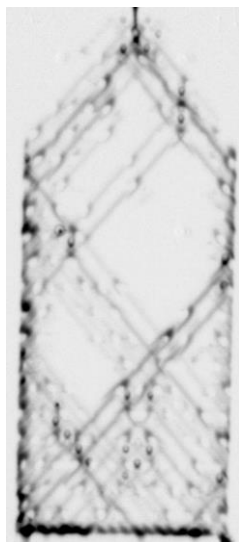
Experimental study of liquid films on the structured packing elements of distillation columns、Manasa PERIYAPATTANA、2021

薄板

水



エタノール100%

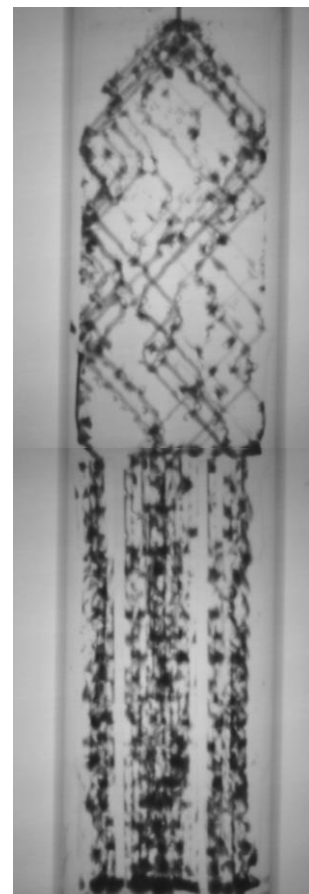
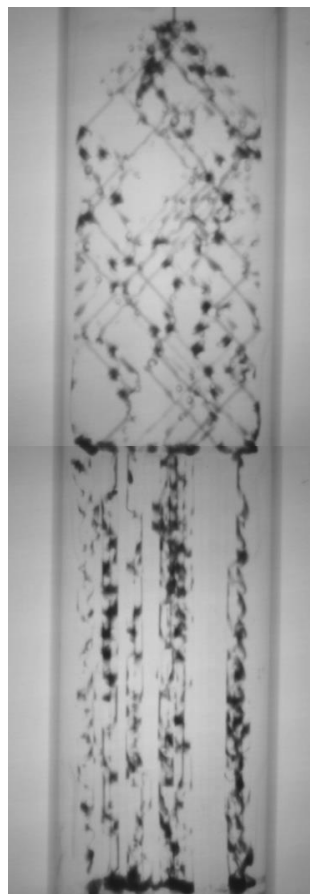
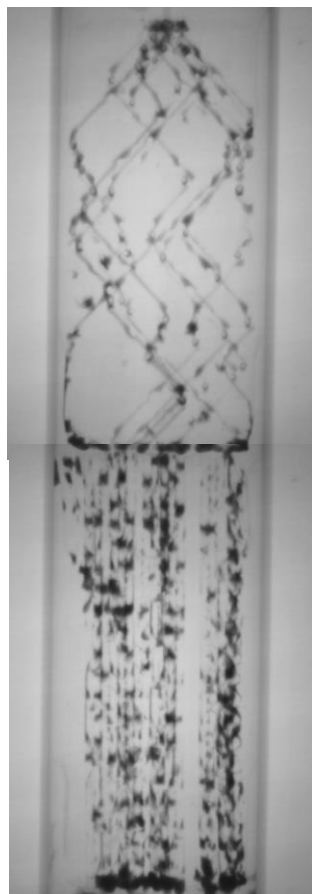
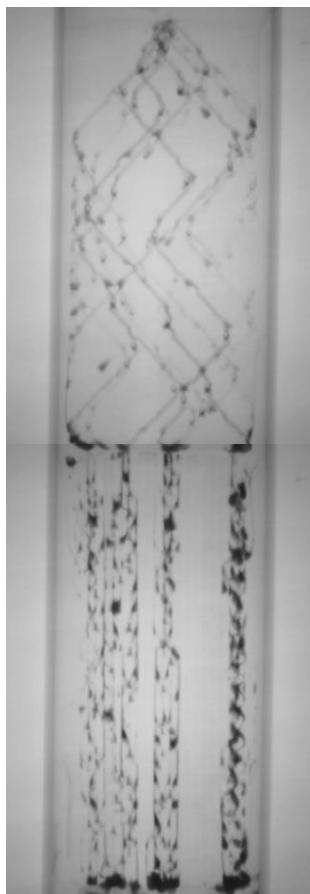


充填塔A 液流量毎 ($j_G=0$ [mm/s] $Q_G=0$ [L/min])

0°

2023.10撮影

$j_L=0.10$ [mm/s] ($Q_L=0.05$ [L/min]) $j_L=0.21$ [mm/s] ($Q_L=0.1$ [L/min]) $j_L=0.42$ [mm/s] ($Q_L=0.2$ [L/min]) $j_L=0.85$ [mm/s] ($Q_L=0.4$ [L/min])

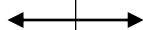


充填塔A 液流量毎 ($j_G=0$ [mm/s] $Q_G=0$ [L/min])

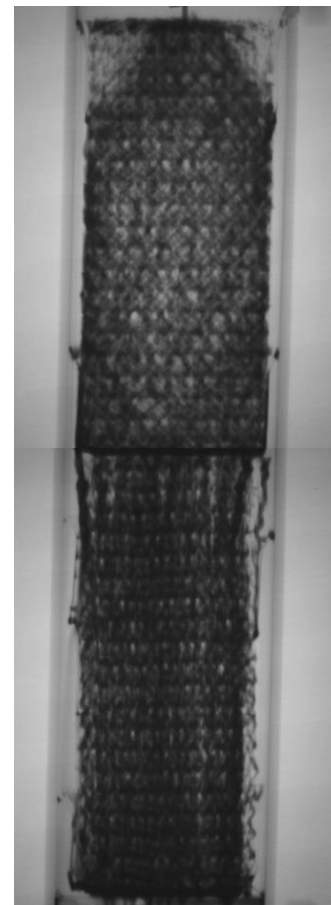
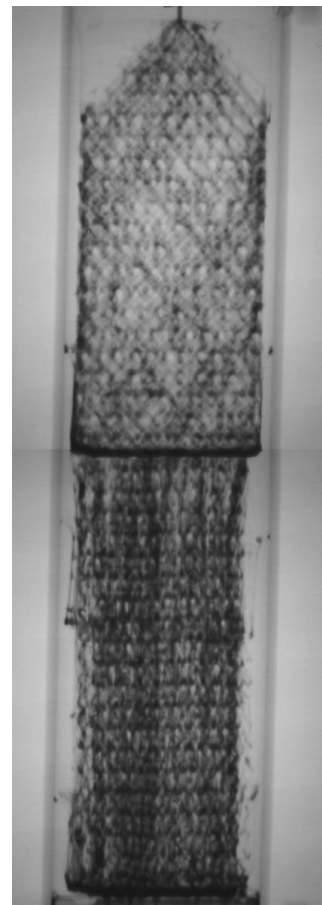
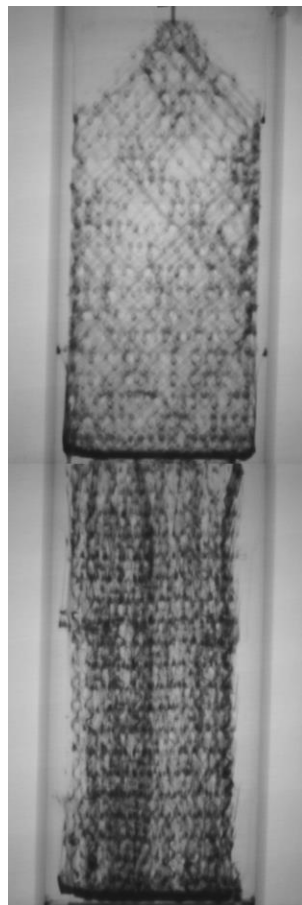
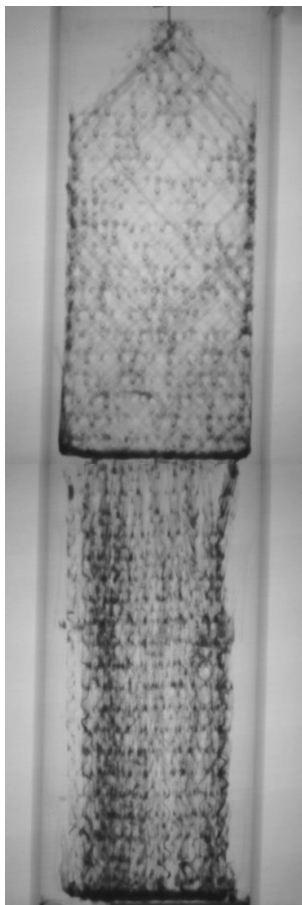
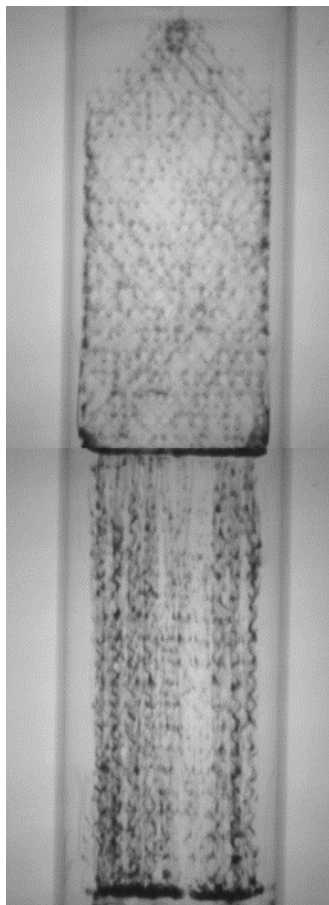
0°

2023.10撮影

2022.10撮影



$j_L=0.10$ [mm/s] ($Q_L=0.05$ [L/min]) $j_L=0.21$ [mm/s] ($Q_L=0.1$ [L/min]) $j_L=0.42$ [mm/s] ($Q_L=0.2$ [L/min]) $j_L=0.85$ [mm/s] ($Q_L=0.4$ [L/min]) $j_L=2.1$ [mm/s] ($Q_L=1.0$ [L/min])



充填塔A 空気流量毎 ($j_L=0.42$ [mm/s] $Q_L=0.2$ [L/min])

2023.10撮影

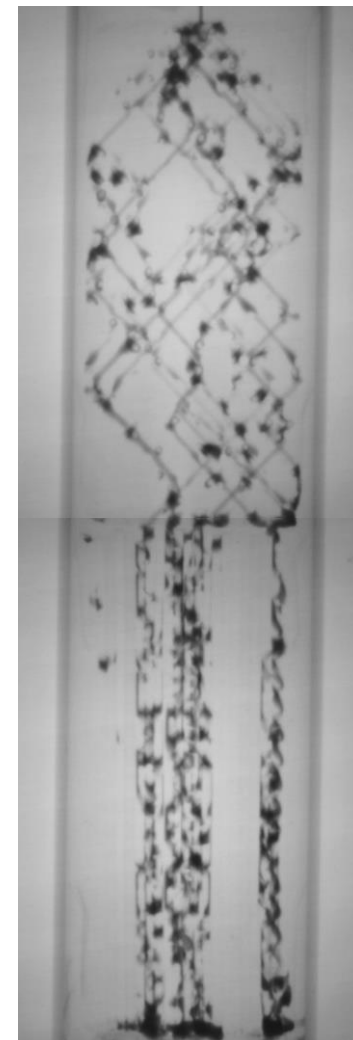
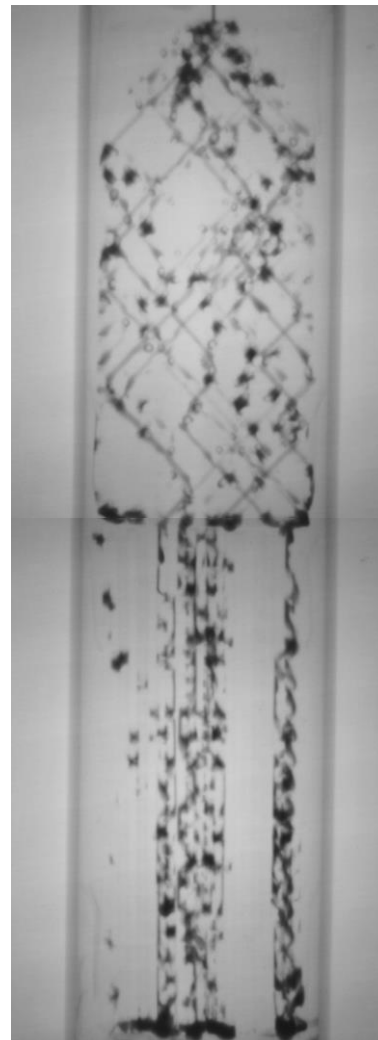
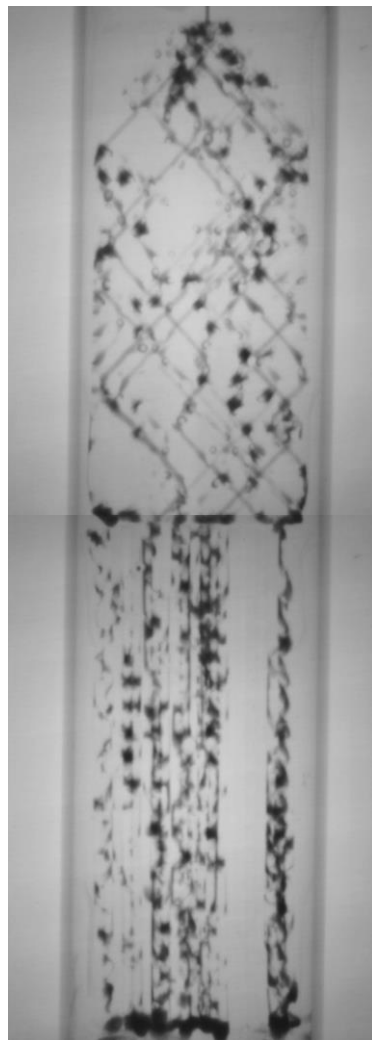
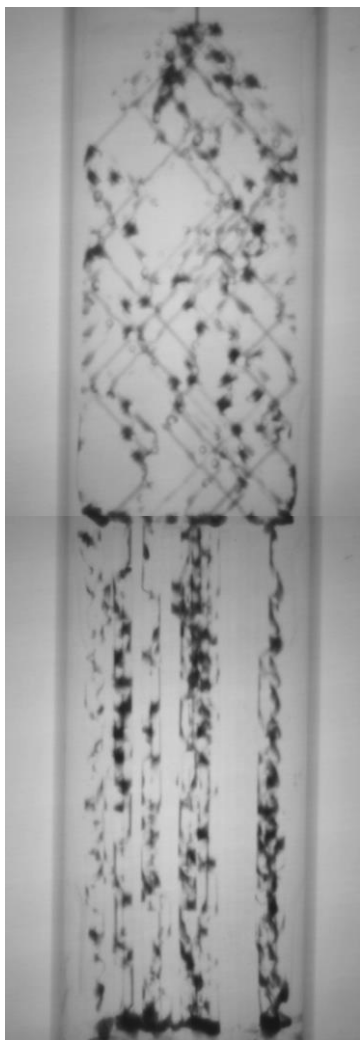
0°

$j_G=0$ [m/s] ($Q_G=0$ [L/min])

$j_G=0.32$ [m/s] ($Q_G=149$ [L/min])

$j_G=0.92$ [m/s] ($Q_G=434$ [L/min])

$j_G=1.5$ [m/s] ($Q_G=790$ [L/min])



充填塔A 空気流量毎 ($j_L=0.21$ [mm/s] $Q_L=0.1$ [L/min])

2022.10撮影

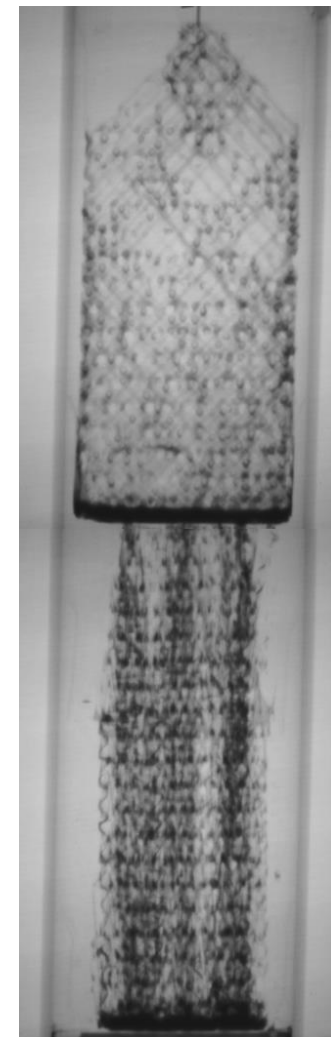
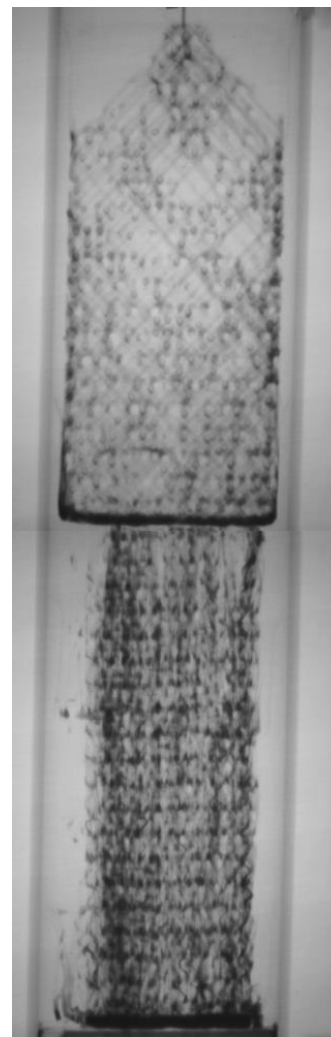
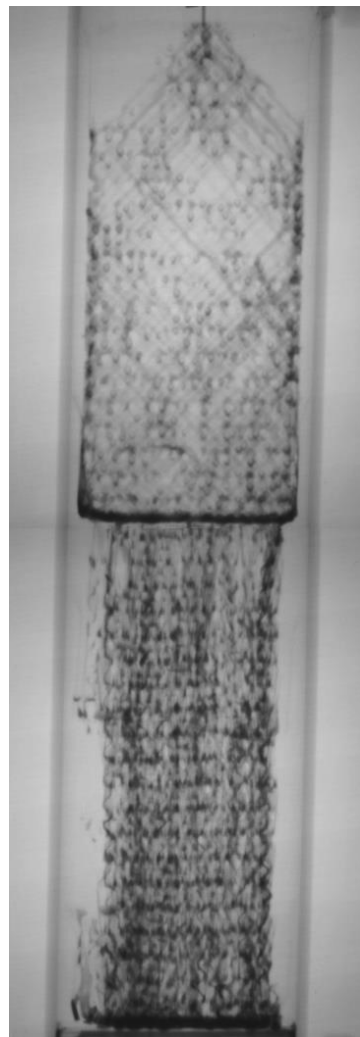
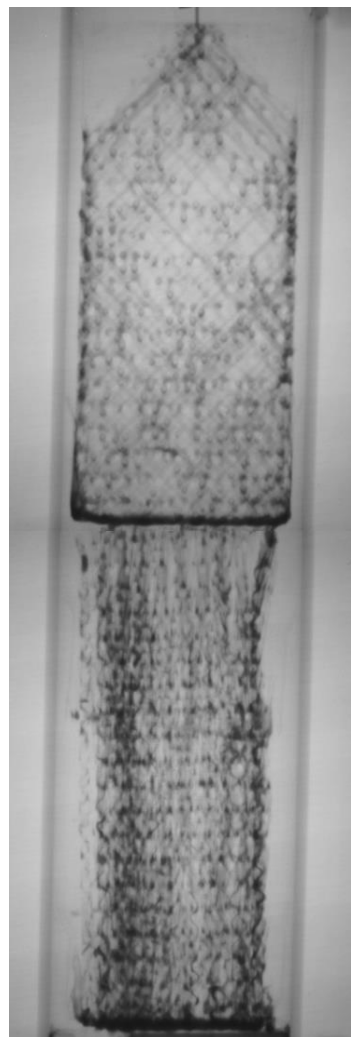
0°

$j_G=0$ [m/s] ($Q_G=0$ [L/min])

$j_G=0.32$ [m/s] ($Q_G=149$ [L/min])

$j_G=0.92$ [m/s] ($Q_G=434$ [L/min])

$j_G=1.5$ [m/s] ($Q_G=790$ [L/min])



CT再構成画像



水

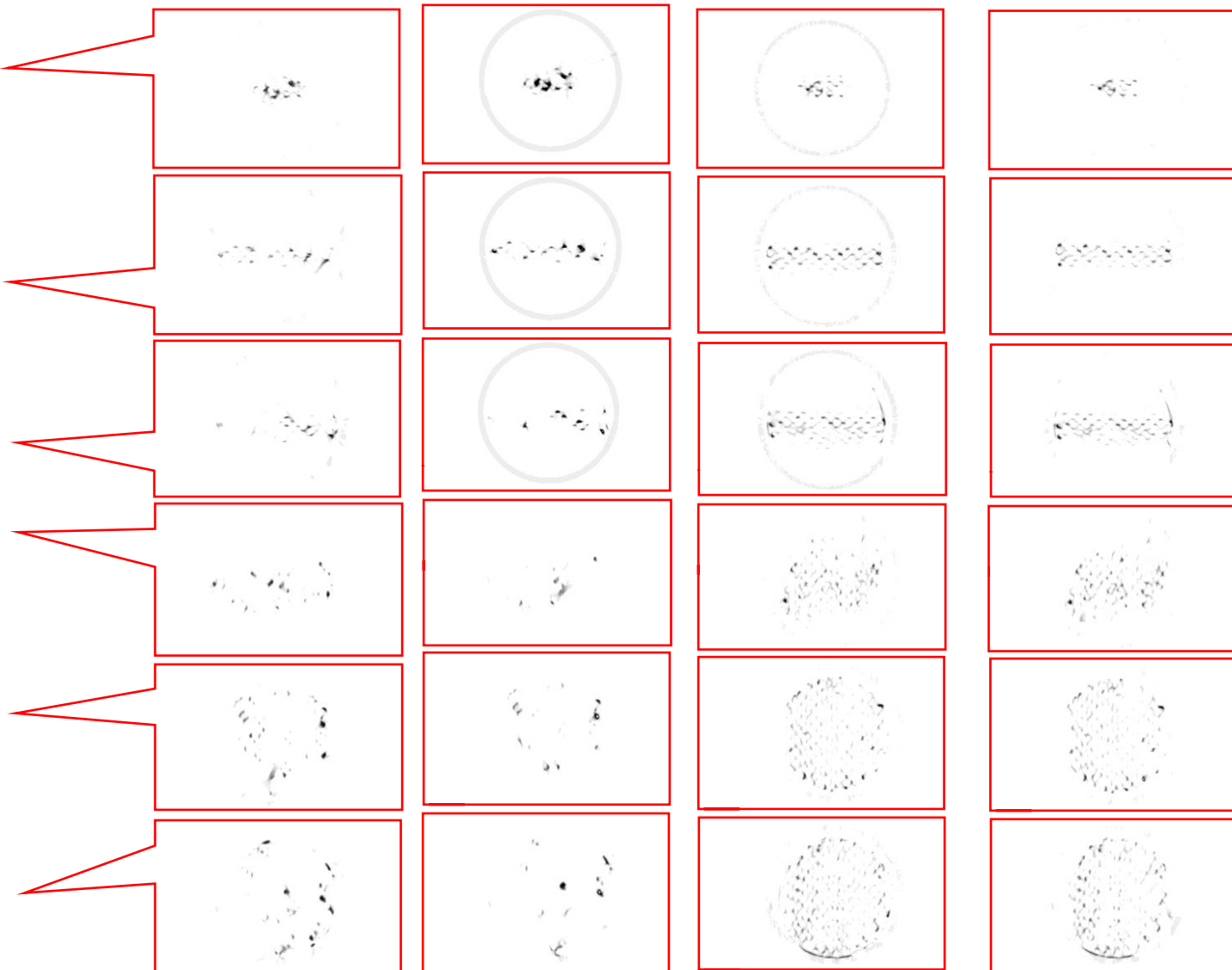
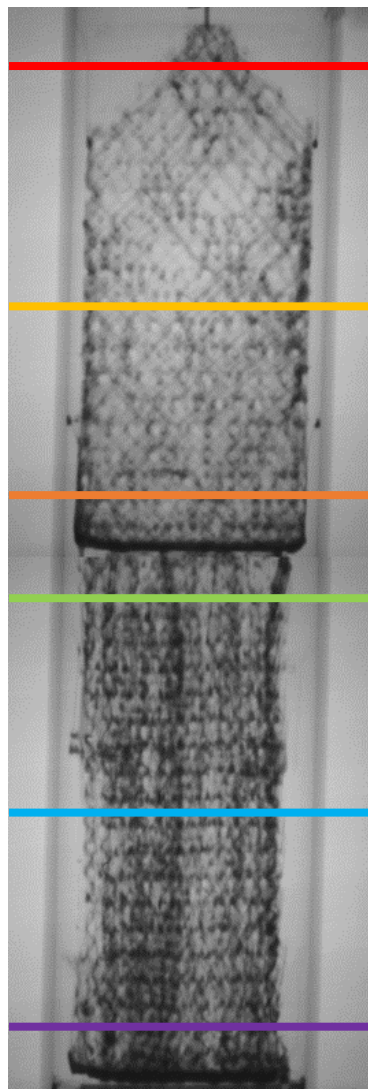
エタノール

$j_G=0$ [m/s]

$j_G=0.92$ [m/s]

$j_G=0$ [m/s]

$j_G=0.92$ [m/s]





メッシュ表面充填物

メッシュ構造充填物



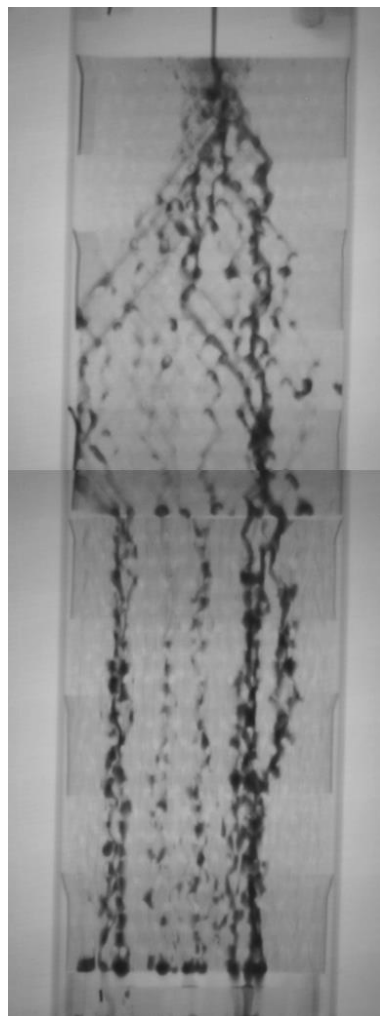
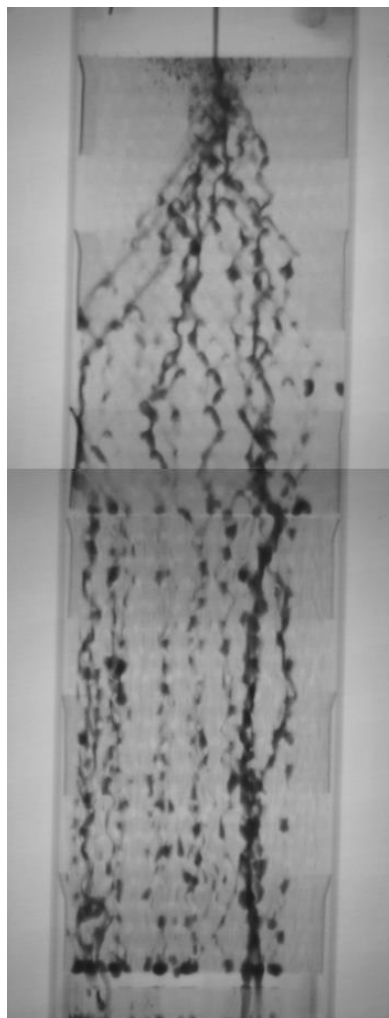
透過画像

$j_L=0.36[\text{mm/s}]$ ($Q_L=0.2 [\text{L/min}]$)

水

$j_G=0 [\text{m/s}]$ ($Q_G=0 [\text{L/min}]$)

$j_G=0.79 [\text{m/s}]$ ($Q_G=434 [\text{L/min}]$)



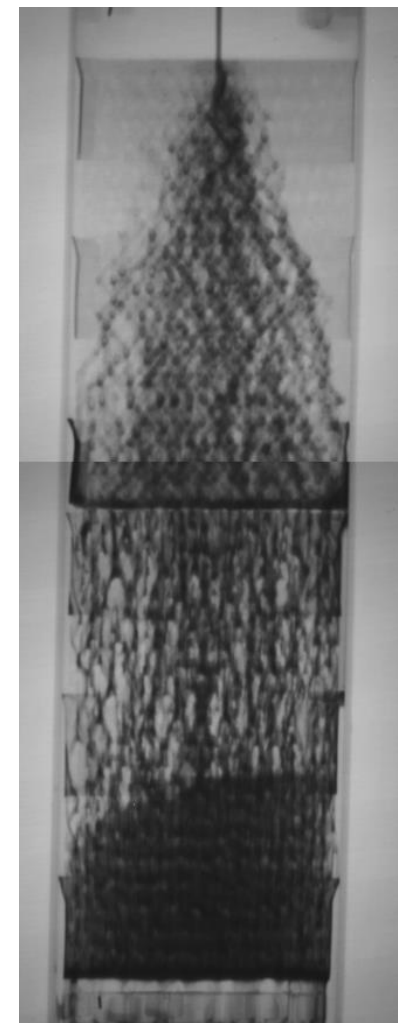
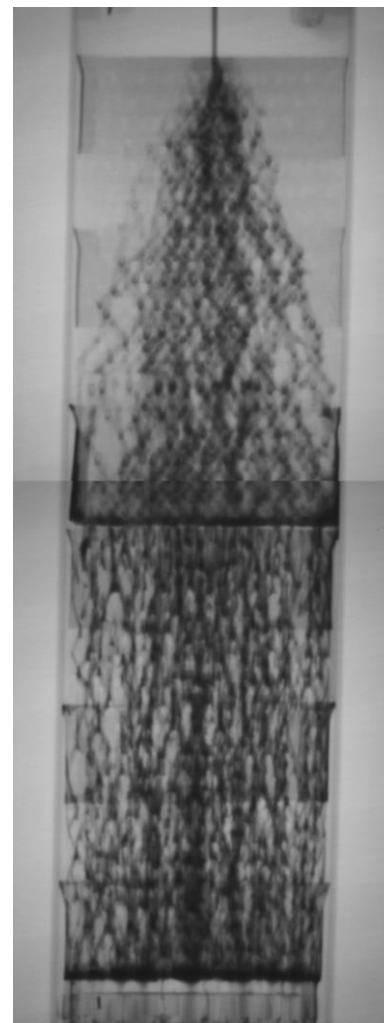
Normal

Parallel

エタノール

$j_G=0 [\text{m/s}]$ ($Q_G=0 [\text{L/min}]$)

$j_G=0.79 [\text{m/s}]$ ($Q_G=434 [\text{L/min}]$)



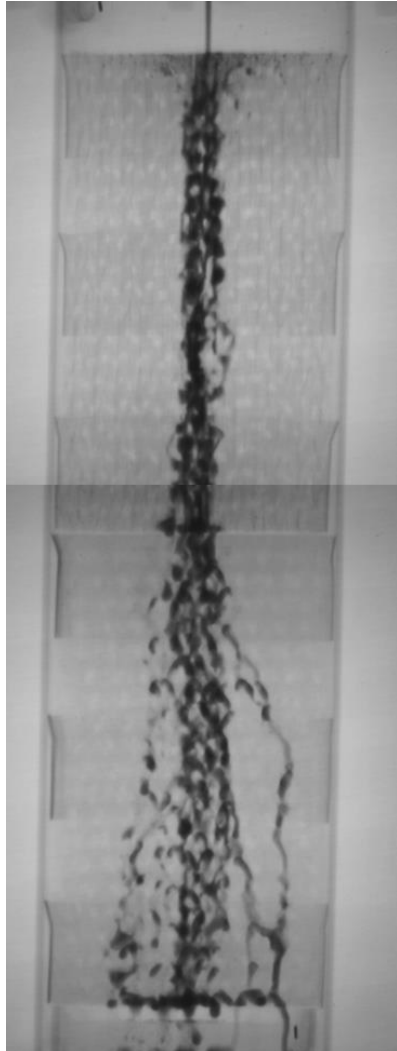
透過画像



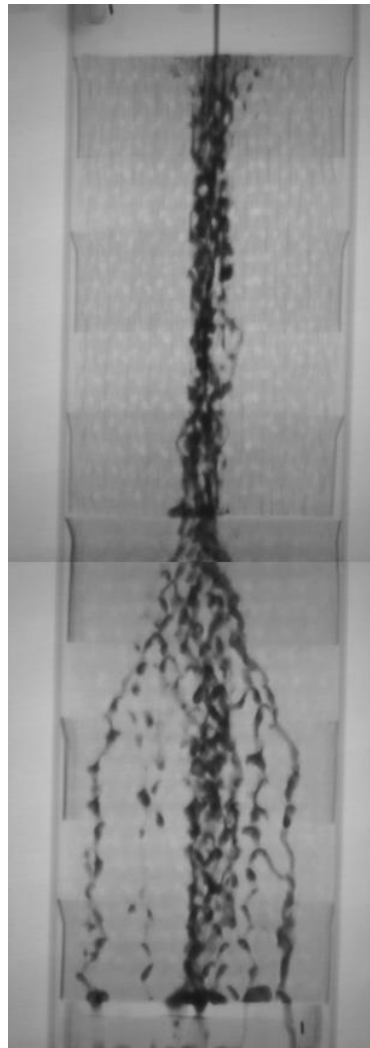
$j_L=0.36[\text{mm/s}]$ ($Q_L=0.2 [\text{L/min}]$)

水

$j_G=0 [\text{m/s}]$ ($Q_G=0 [\text{L/min}]$)

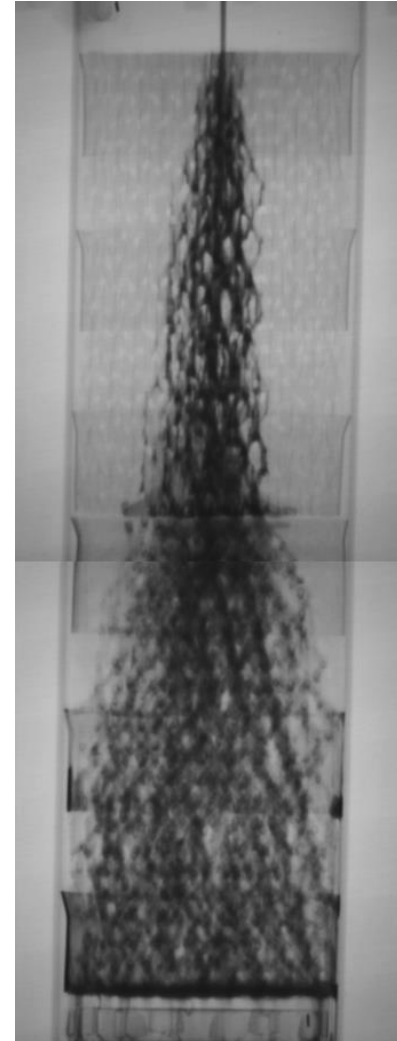


$j_G=0.79 [\text{m/s}]$ ($Q_G=434 [\text{L/min}]$)

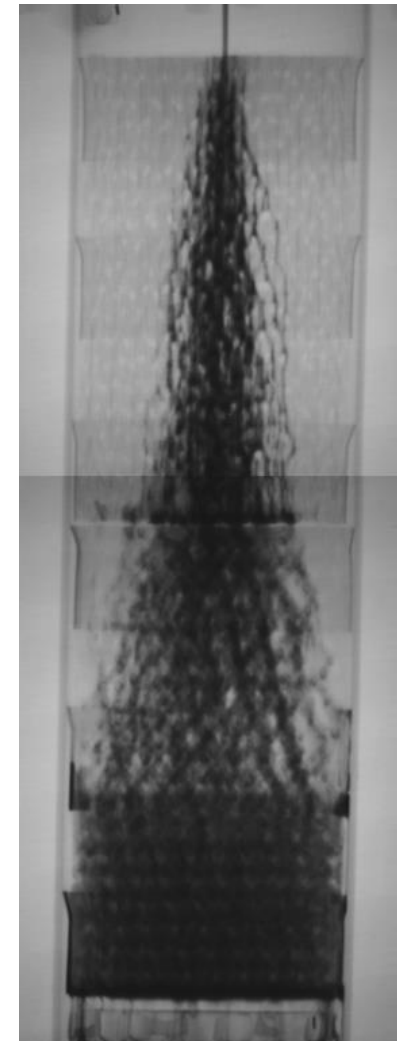


エタノール

$j_G=0 [\text{m/s}]$ ($Q_G=0 [\text{L/min}]$)



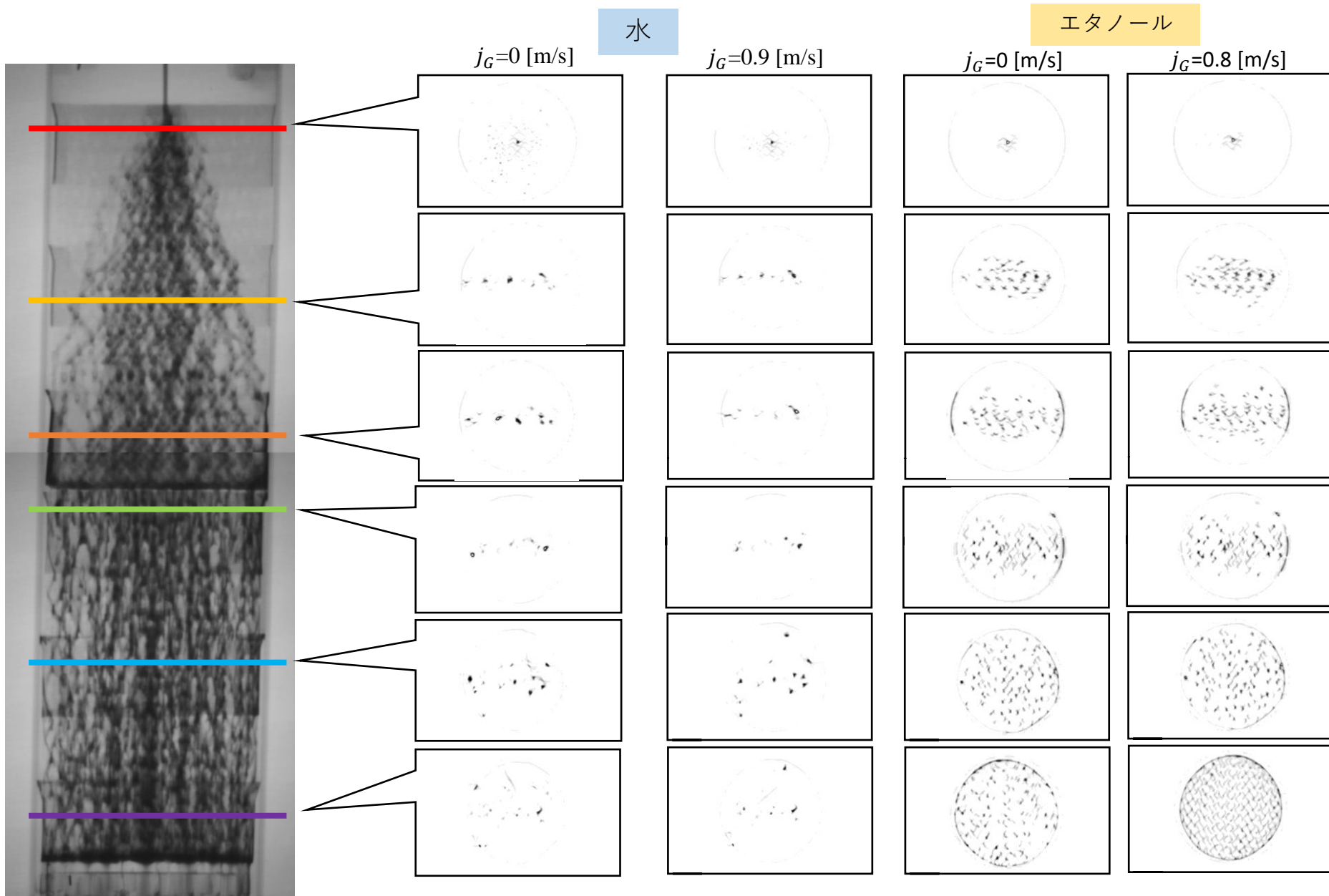
$j_G=0.79 [\text{m/s}]$ ($Q_G=434 [\text{L/min}]$)



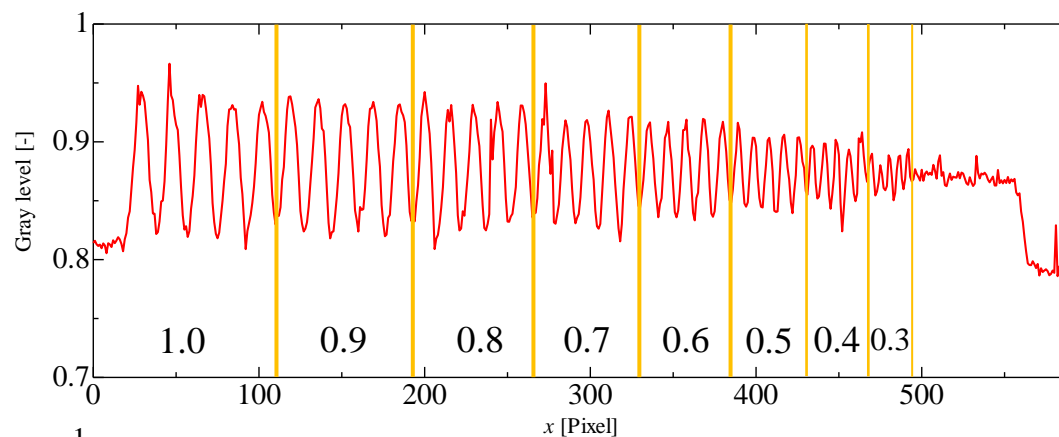
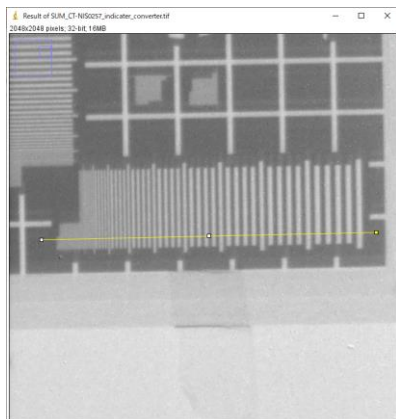
Parallel

Normal

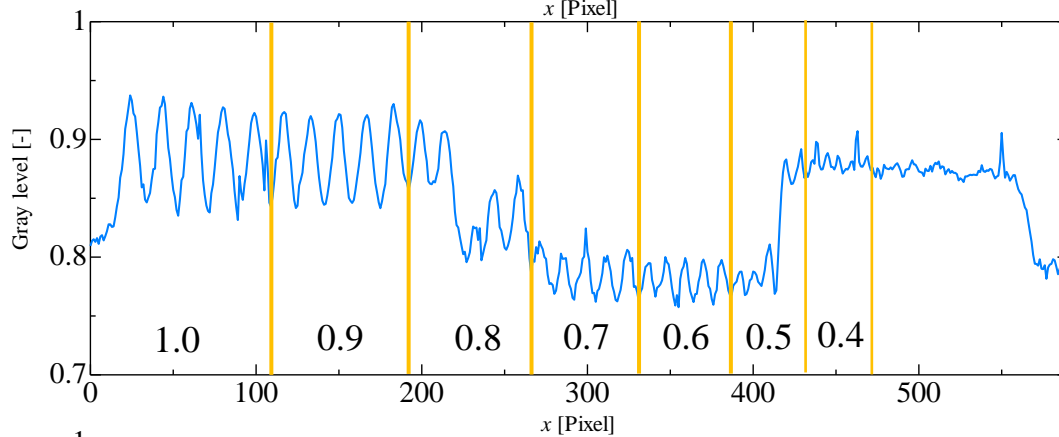
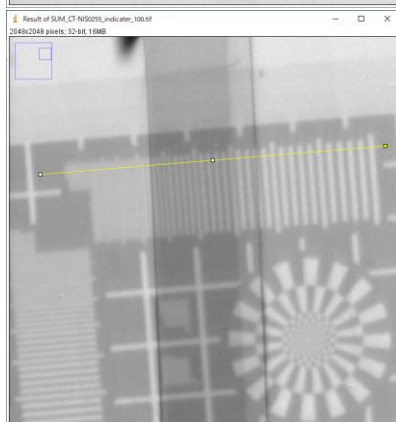
CT再構成画像



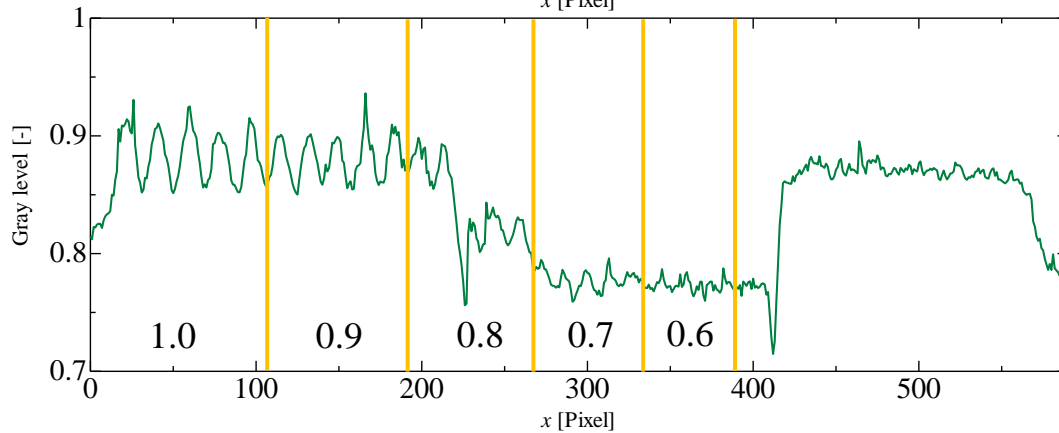
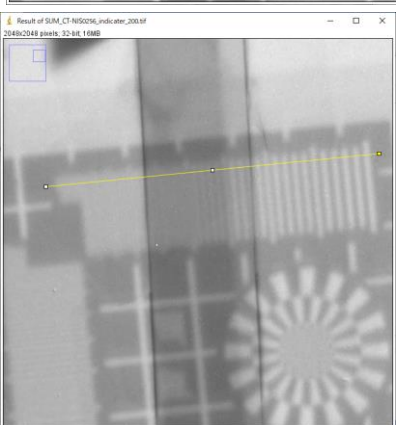
0



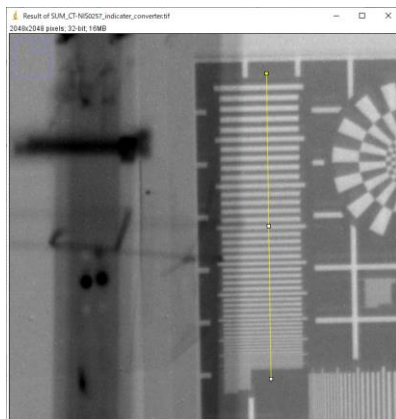
100



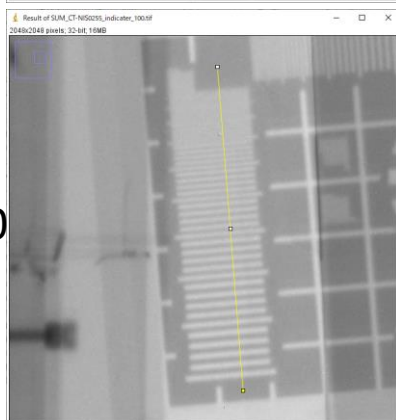
200



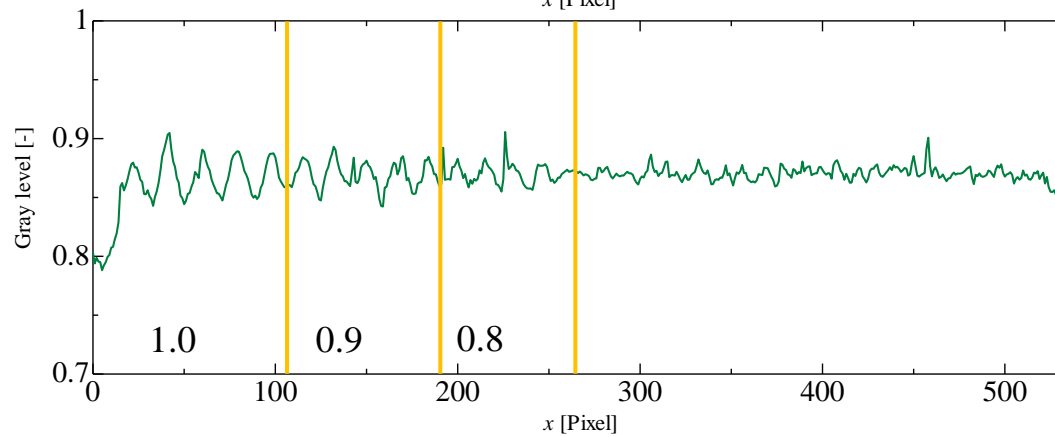
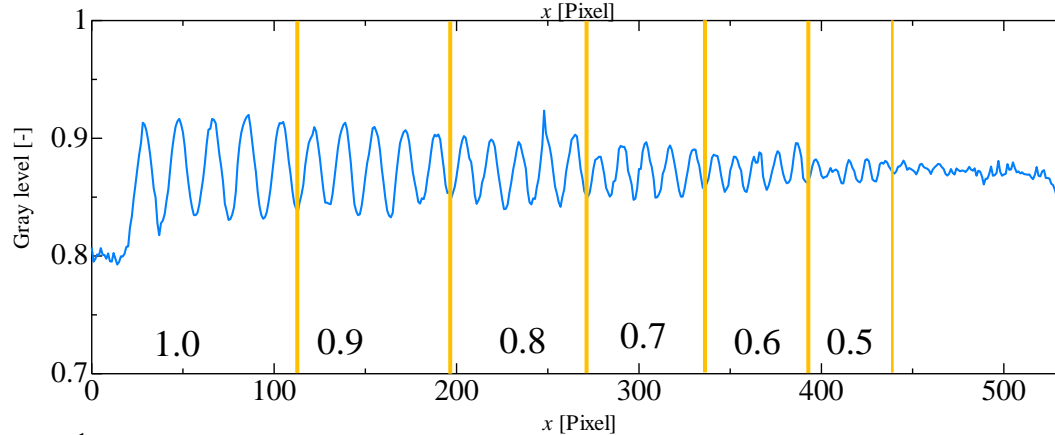
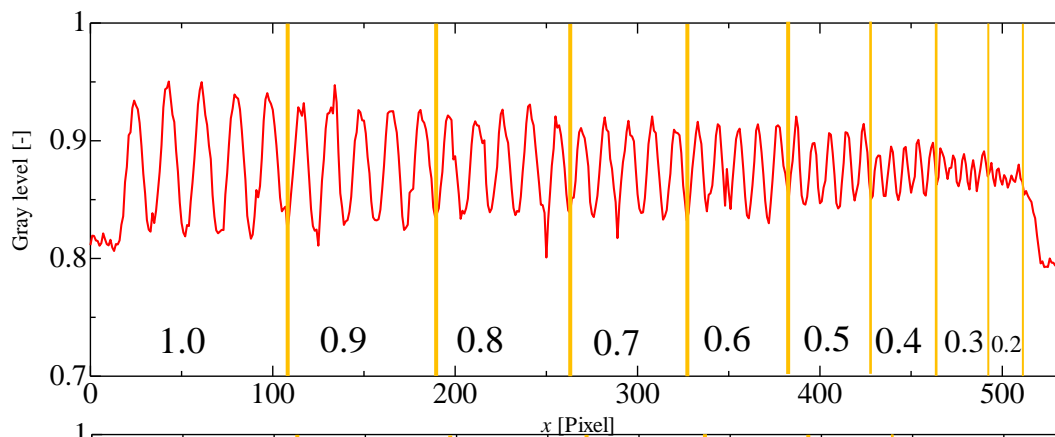
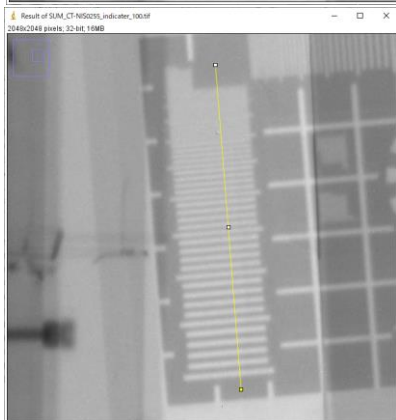
0



100



200



$$d_h = 2.6[\text{mm}]$$

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_h} \frac{\rho_G j_G}{2}$$

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_h} \frac{\rho_G j_G}{2}$$

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

$$\Rightarrow d_h = 2.6[\text{mm}]$$

