

令和3年度中性子イメージング研究会

中性子ラジオグラフィによるミニチャネル直交型蒸発器内
冷媒二相流の可視化・計測

Visualization and Measurement of Refrigerant Two-Phase Flow in Cross-Flow
Mini-Channel Evaporator by Neutron Radiography

© 井上隼介 清原 圭太 村川 英樹 杉本 勝美 浅野 等

神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻

近年、地球温暖化抑制のために温室効果ガスの発生量が少ない水素、天然ガスの利用が進められている

水素ステーション向けの冷却器やLNG気化器のような用途の熱交換器は高耐圧性が不可欠であり、従来は多管式熱交換器が利用されている

○多管式熱交換器の問題点...サイズ、重量が大きく設置場所が限られる

都市部での水素ステーションやLNG燃料船といった設置空間の限られた場所での適用が難しい

⇒ 高耐圧性を有していながらも、コンパクト性に優れた
拡散接合マイクロチャネル熱交換器に着目

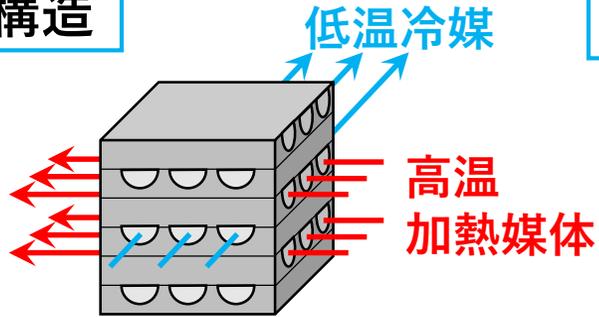
拡散接合マイクロチャネル熱交換器



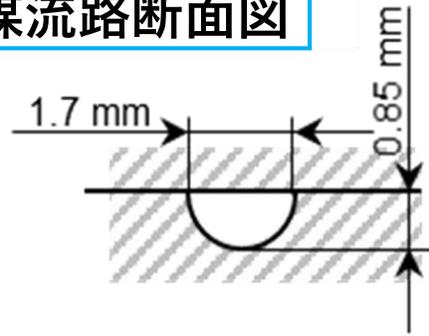
参考: <http://www.kobelco.co.jp/products/ecmachinery/dche/overview.html>

研究背景

内部構造



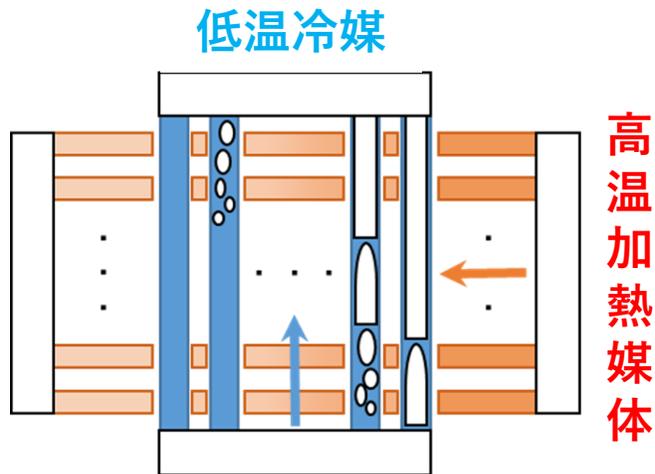
冷媒流路断面図



- ・ 高温側と低温側の流路が直交
- ・ 多数の半円細径並行流路で構成されている
(ミリ, マイクロサイズ)
- ・ 流路は化学エッチングによって形成している
 - ・ mm以下のサイズでの形成が可能
 - ・ 流路断面形状は半円形となる

加熱媒体の入口に近い側の冷媒流路で温度差が大きく熱流束が相対的に高くなる

蒸発器の場合



不均一な熱流束分布



流路間の乾き度の差



偏流による熱交換性能の劣化

研究目的

直交型蒸発器における冷媒流路リブ形状の偏流改善効果の評価

研究内容

対象

・ SUS製 単層 のミニチャンネル直交型蒸発器における加熱媒体の加熱による鉛直上昇沸騰二相流

評価方法

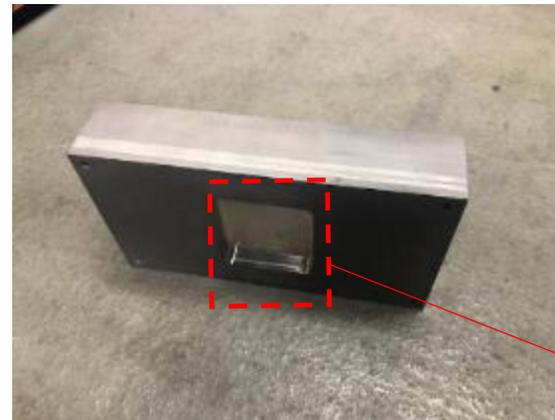
・ 冷媒相分布の可視化・計測

中性子ラジオグラフィによるボイド率計測

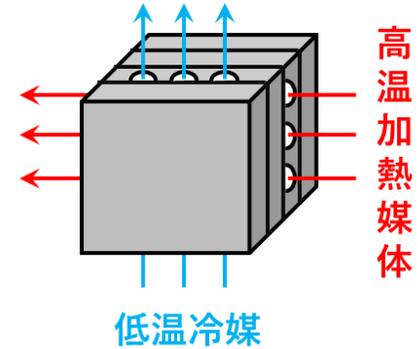
試験体

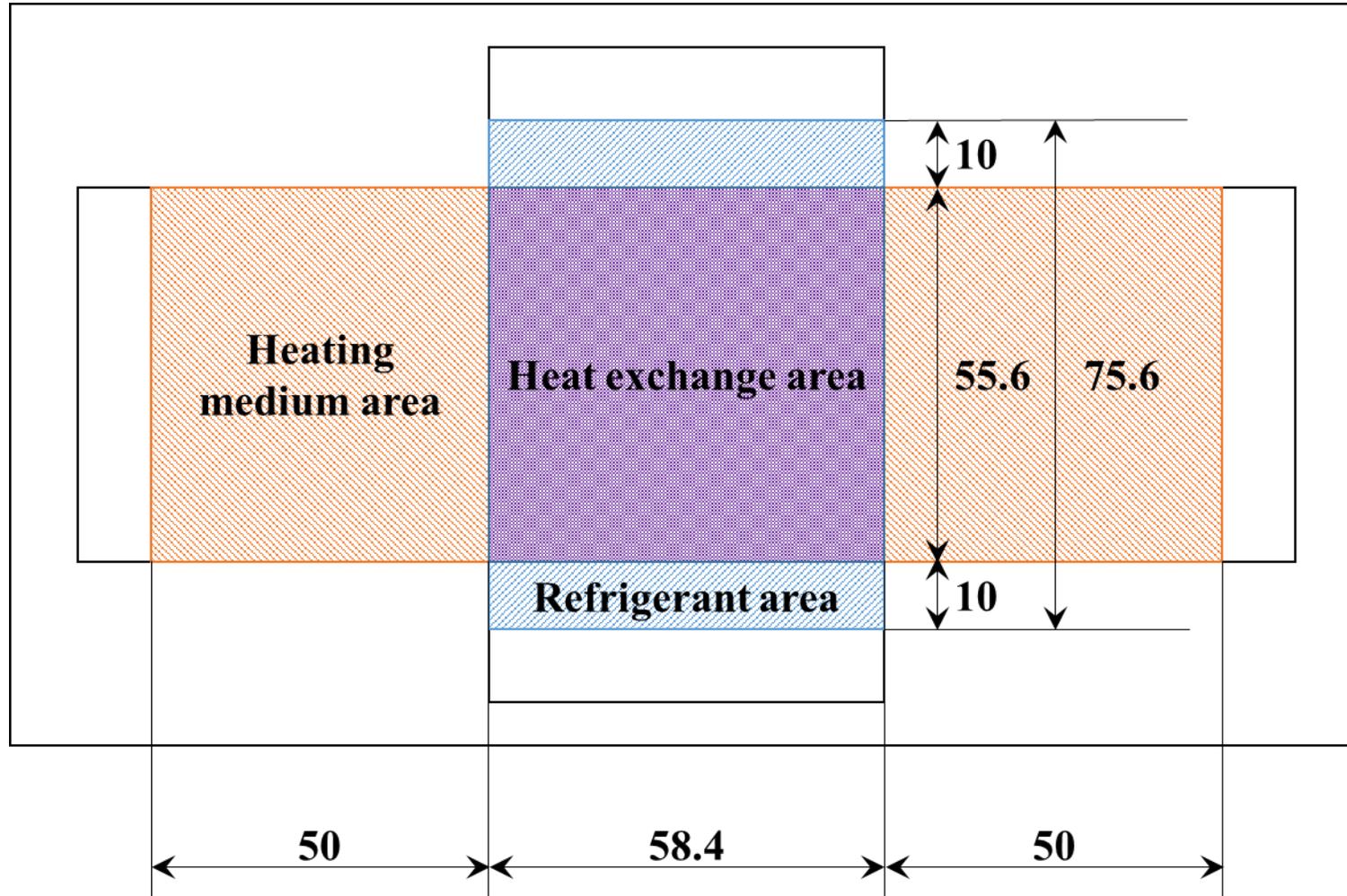


拡散接合により、直交した流路を内蔵



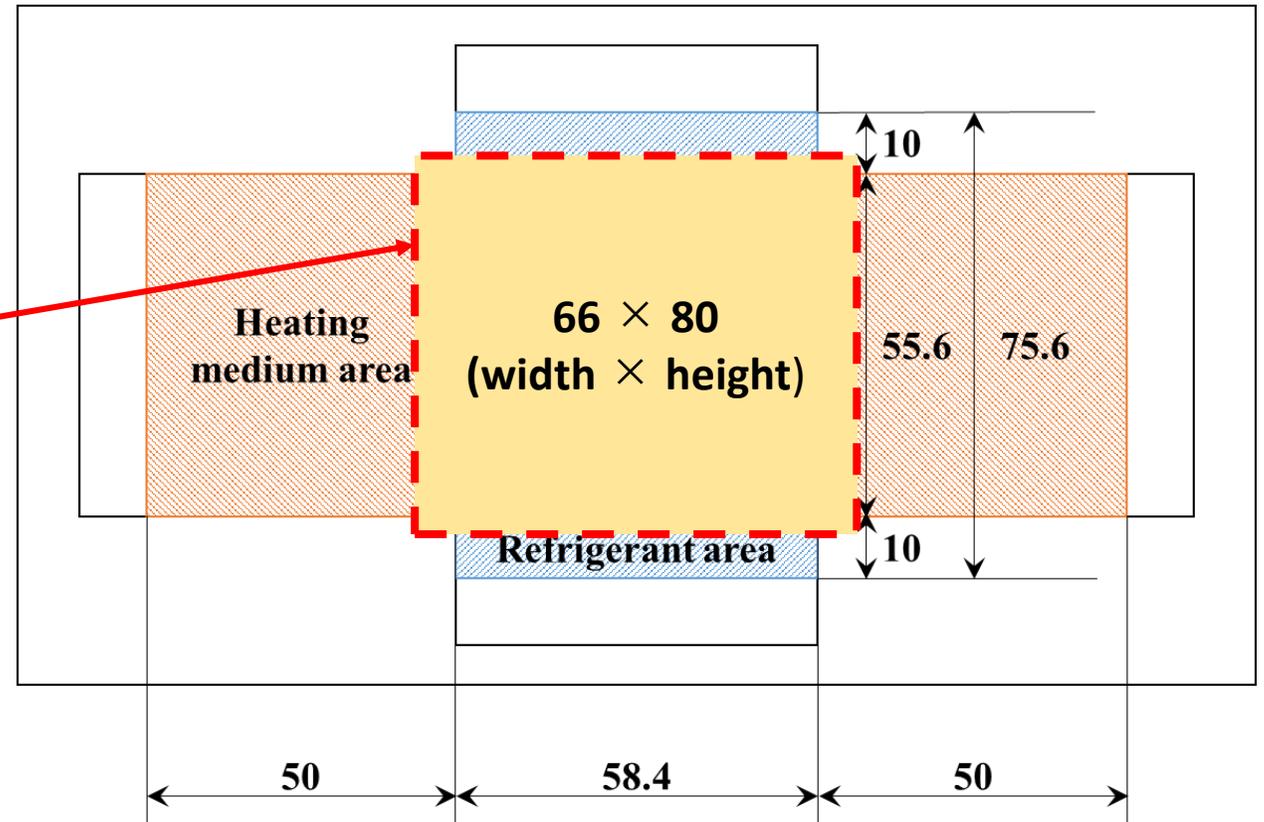
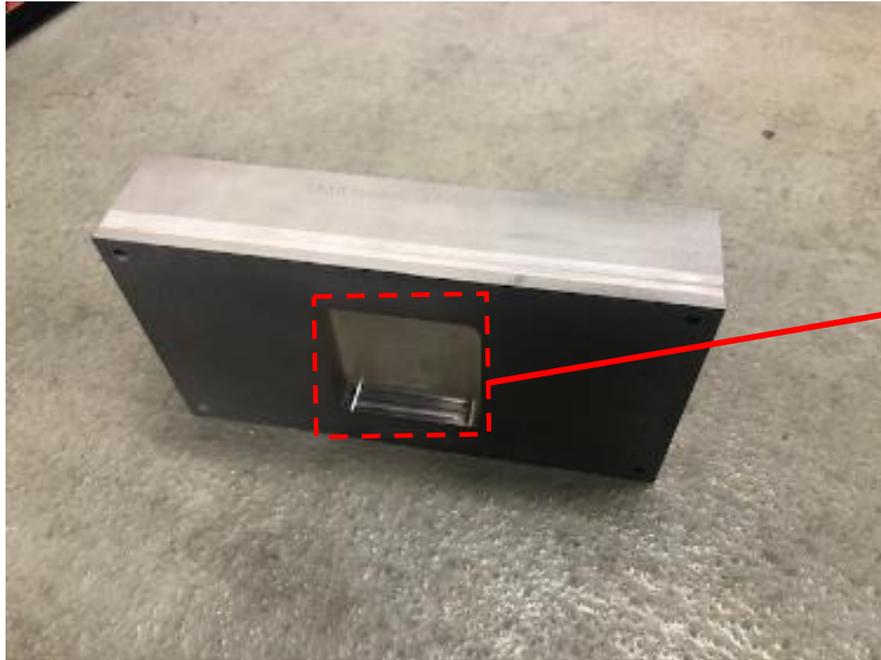
可視化区間（中性子線照射箇所）は切削加工することで、薄くしている





(Unit : mm)

加熱流路は全ての冷媒流路に対して統一



(Unit : mm)

□ 厚さ δ の物体に中性子線を透過させた際の画像輝度

$$S(x, y) = G \exp(-\rho \mu_m \delta) + O(x, y)$$

δ : 物体の厚さ
 ρ : 密度
 μ_m : 質量減衰係数

✓ 液で満たされている場合

$$S_{full}(x, y) = G \exp\left(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x, y) - \rho_L \mu_{mL} \delta_{full}(x, y)\right) + O(x, y)$$

✓ 蒸気で満たされている場合

$$S_{empty}(x, y) = G \exp\left(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x, y)\right) + O(x, y)$$

✓ 気液二相流の場合

$$S_n(x, y) = G \exp\left(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x, y) - \rho_L \mu_{mL} \delta_L(x, y)\right) + O(x, y)$$

$\rho_L \gg \rho_G$ より減衰を無視

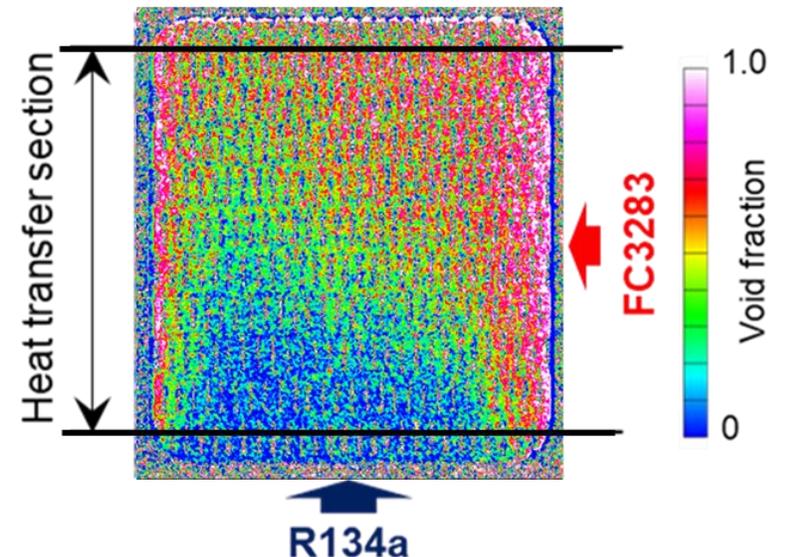
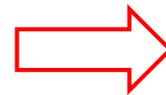
$$\delta_{full}(x, y) = \frac{1}{\rho_L \mu_{mL}} \ln \left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{S_{Full}(x, y) - O} \right)$$

$$\delta_L(x, y) = \frac{1}{\rho_L \mu_{mL}} \ln \left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{S_n(x, y) - O} \right)$$

□ 中性子線照射方向のボイド率

$$\alpha(x, y) = 1 - \frac{\delta_L(x, y)}{\delta_{full}(x, y)} = 1 - \frac{\ln \left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{S_n(x, y) - O} \right)}{\ln \left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{S_{full}(x, y) - O} \right)}$$

各画素の輝度値から、この方法でボイド率を演算し、カラープロットすることで、ボイド率分布画像を取得



京都大学複合原子力科学研究所 研究炉 B4ポート

- ・ 中性子束： $1.7 \times 10^7 \text{ n/cm}^2\text{s}$ (@1MW)
- ・ 照射野 (W×H)： $30 \times 90 \text{ mm}$

撮影したい箇所 (66×80) に対して
照射野が小さいので5分割して撮影

冷却CCDカメラ

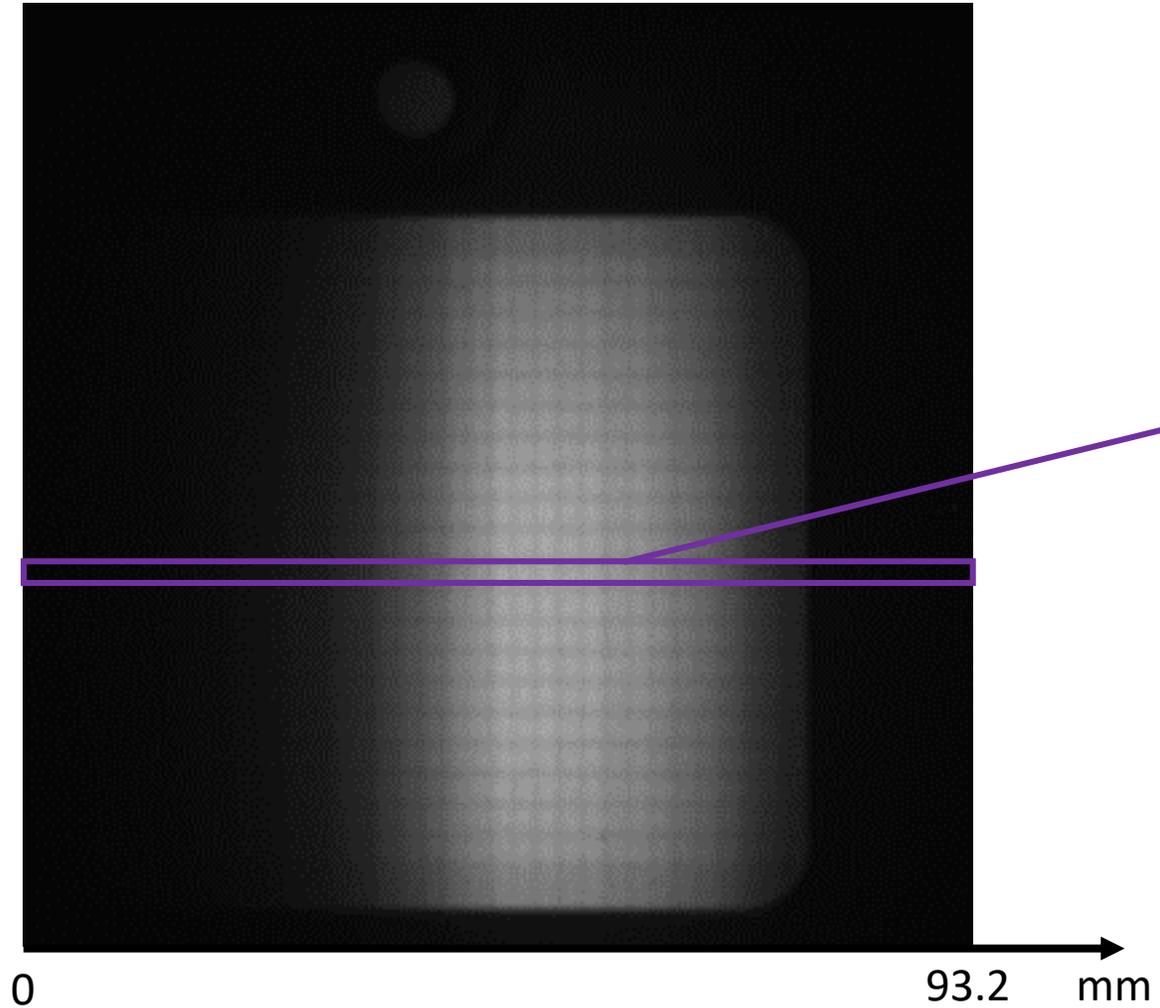
- ・ レンズサイズ：105 mm
- ・ 画像サイズ：1024×1024 pixel
- ・ 画素寸法：86～91 μm/pixel
- ・ 輝度階調：16 bit (65536)
- ・ 露光時間：15, 30 秒

日本原子力研究開発機構 研究炉 7R

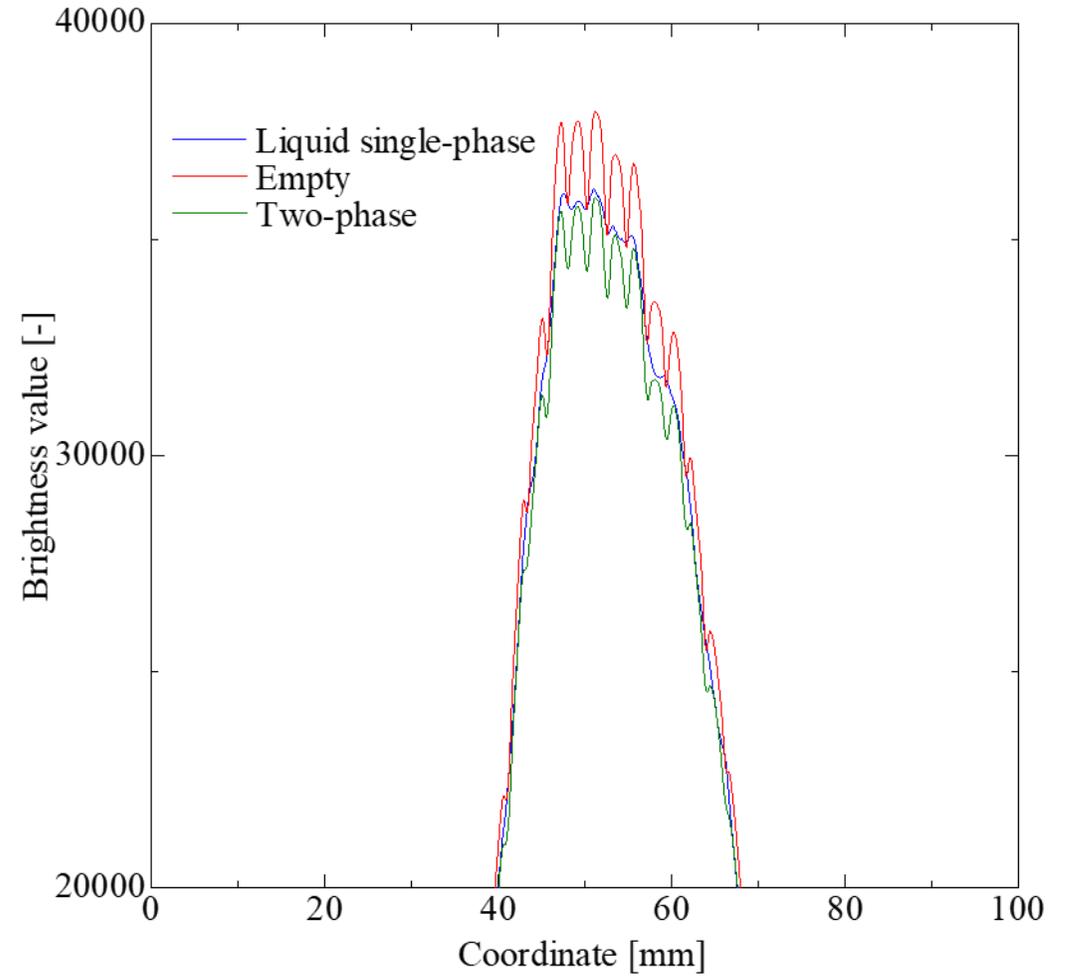
- ・ 中性子束： $1.0 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$ (@20MW)
- ・ 照射野 (W×H)： $255 \times 305 \text{ mm}$

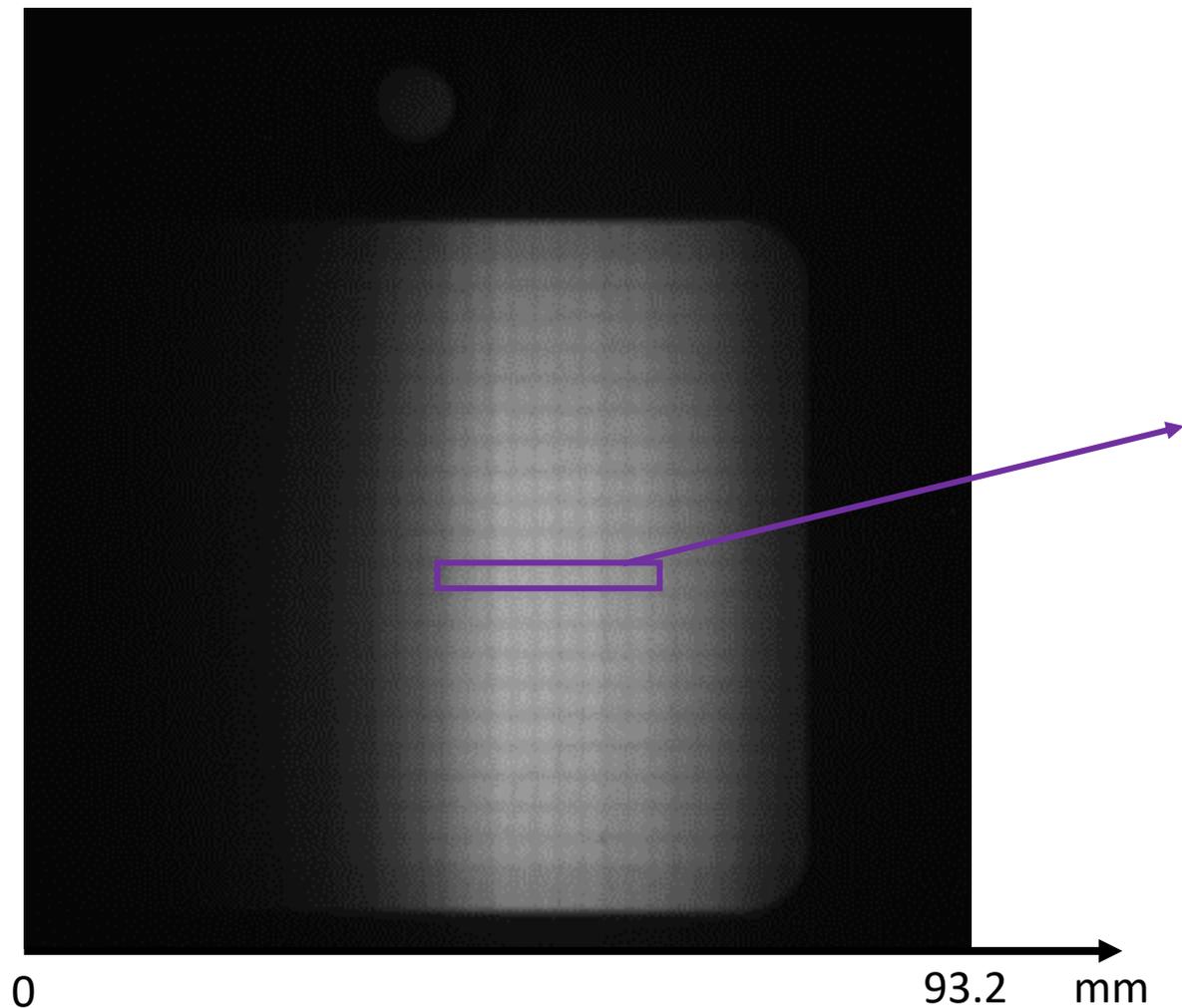
高速度カメラ Photron

- ・ レンズサイズ：105 mm
- ・ 画像サイズ：1024×1024 pixel
- ・ 画素寸法：156 μm/pixel
- ・ 輝度階調：12 bit (4096)
- ・ 露光時間：1/125 秒
- ・ 撮影レート：125 fps
- ・ 撮影枚数：5000枚

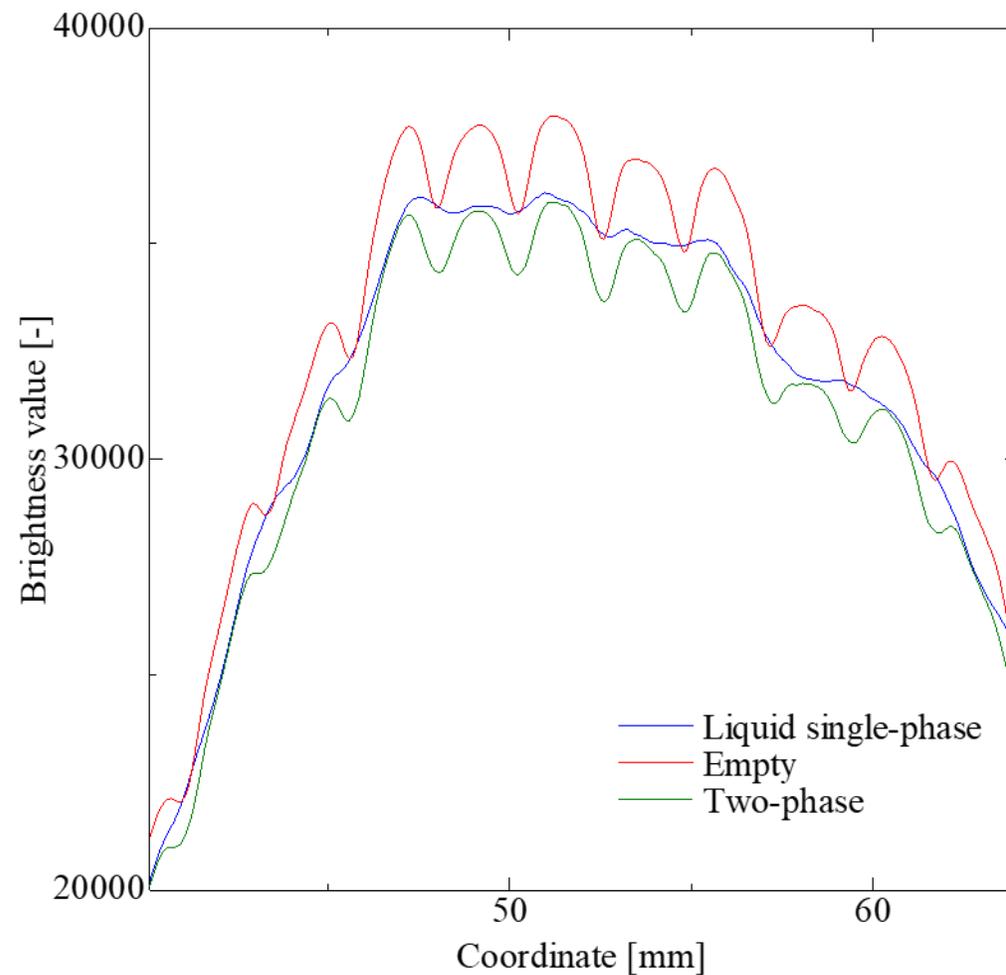


紫枠部分の輝度プロファイル

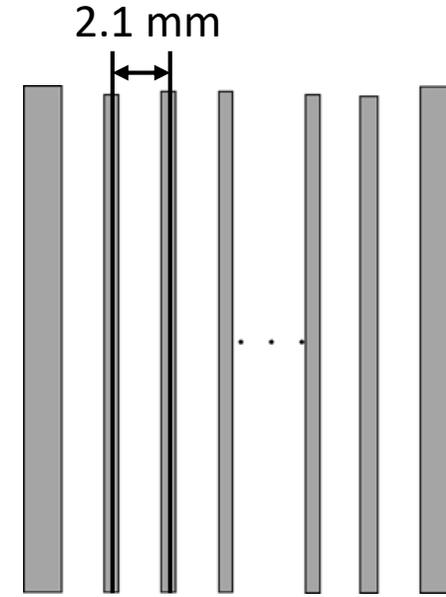
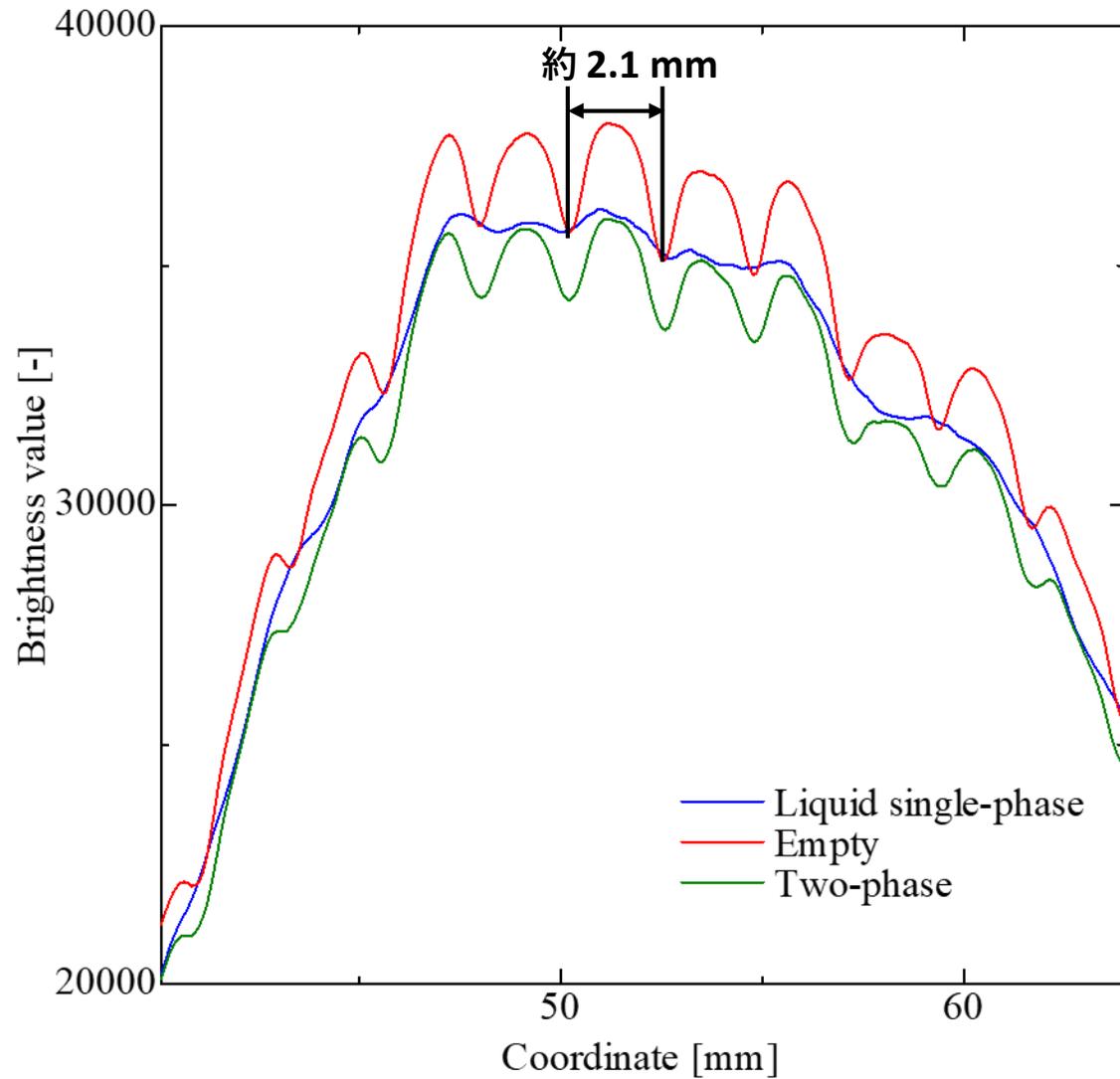




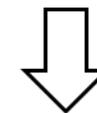
紫枠部分の輝度プロファイル



中性子線強度に時間的変動があると考えられる



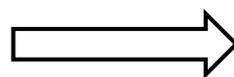
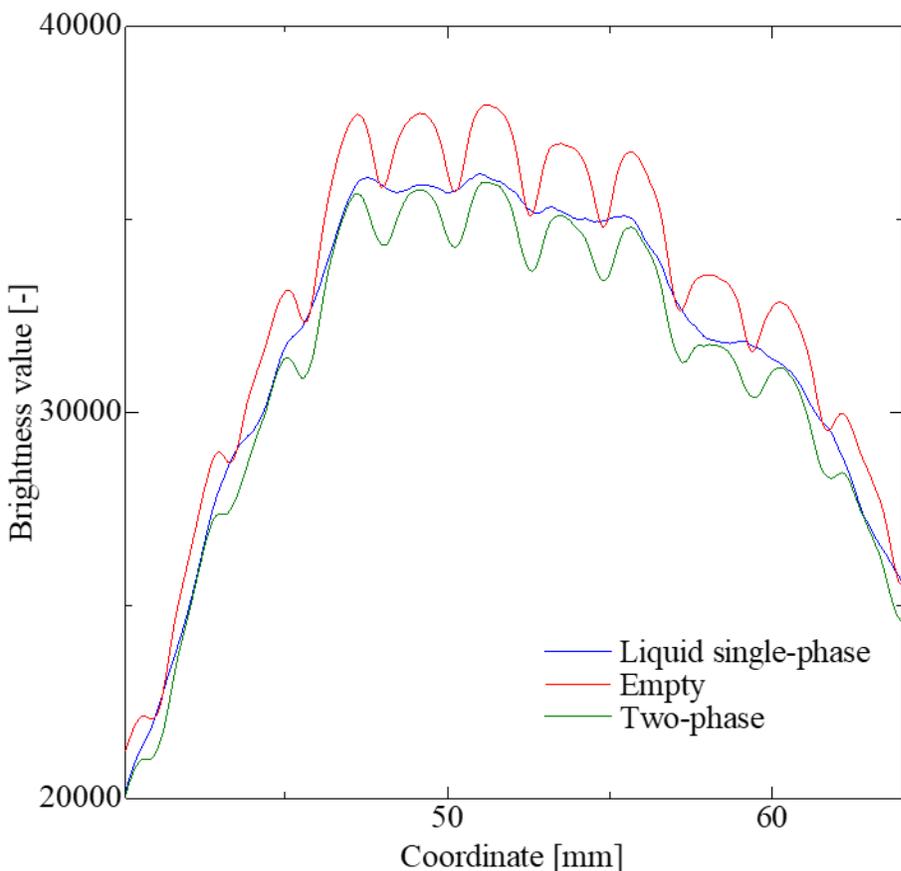
輝度の波の幅が流路のピッチに相当



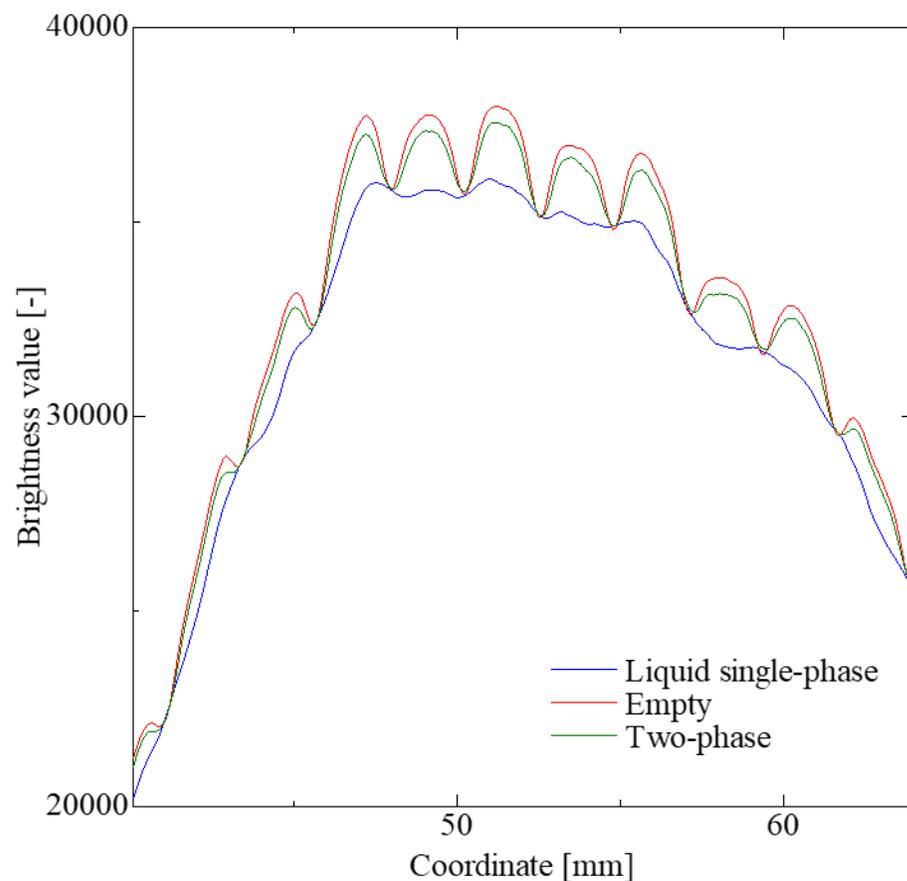
谷の部分の輝度値が一致するように、
それぞれの輝度に一律の係数をかけて補正

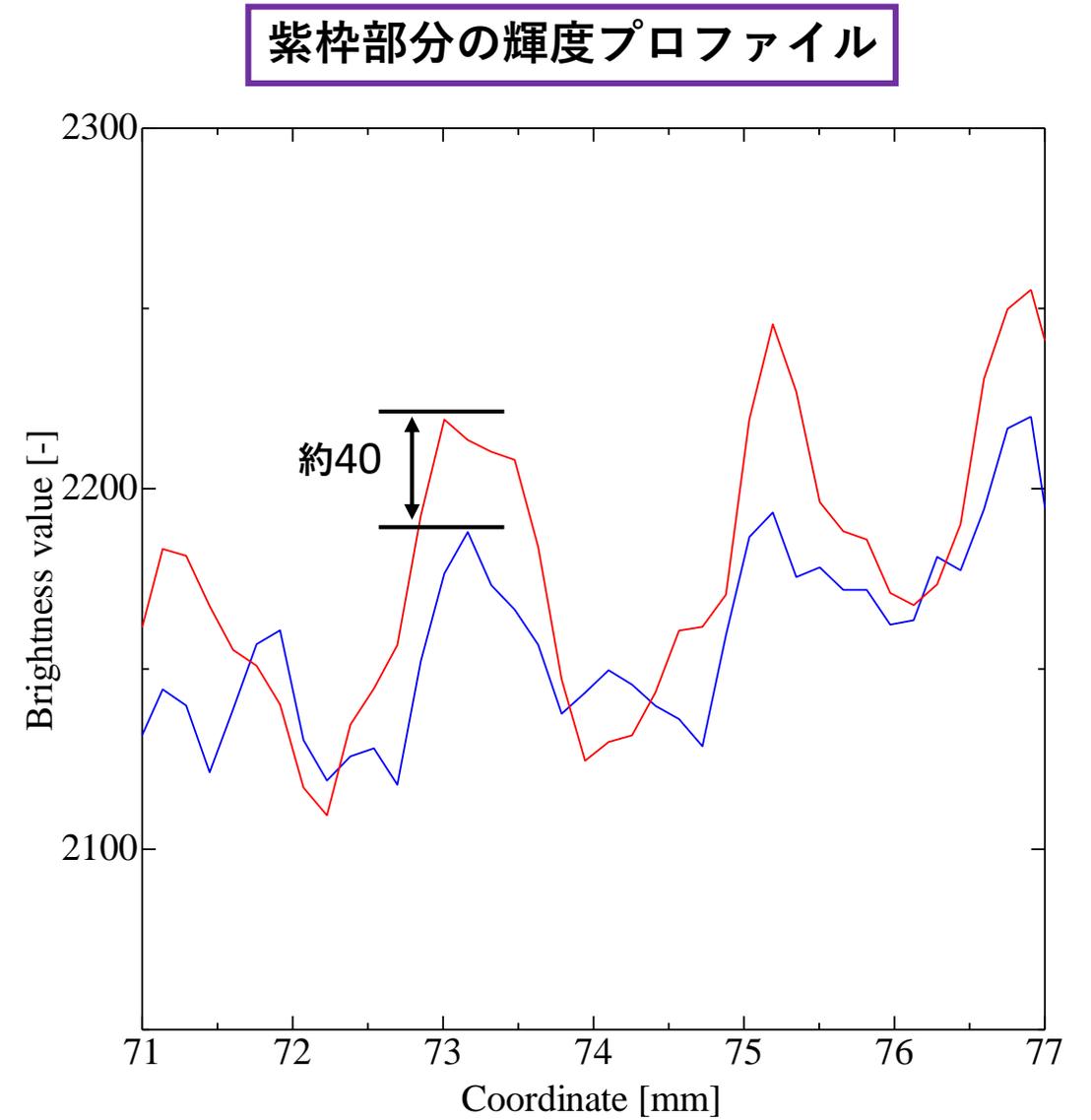
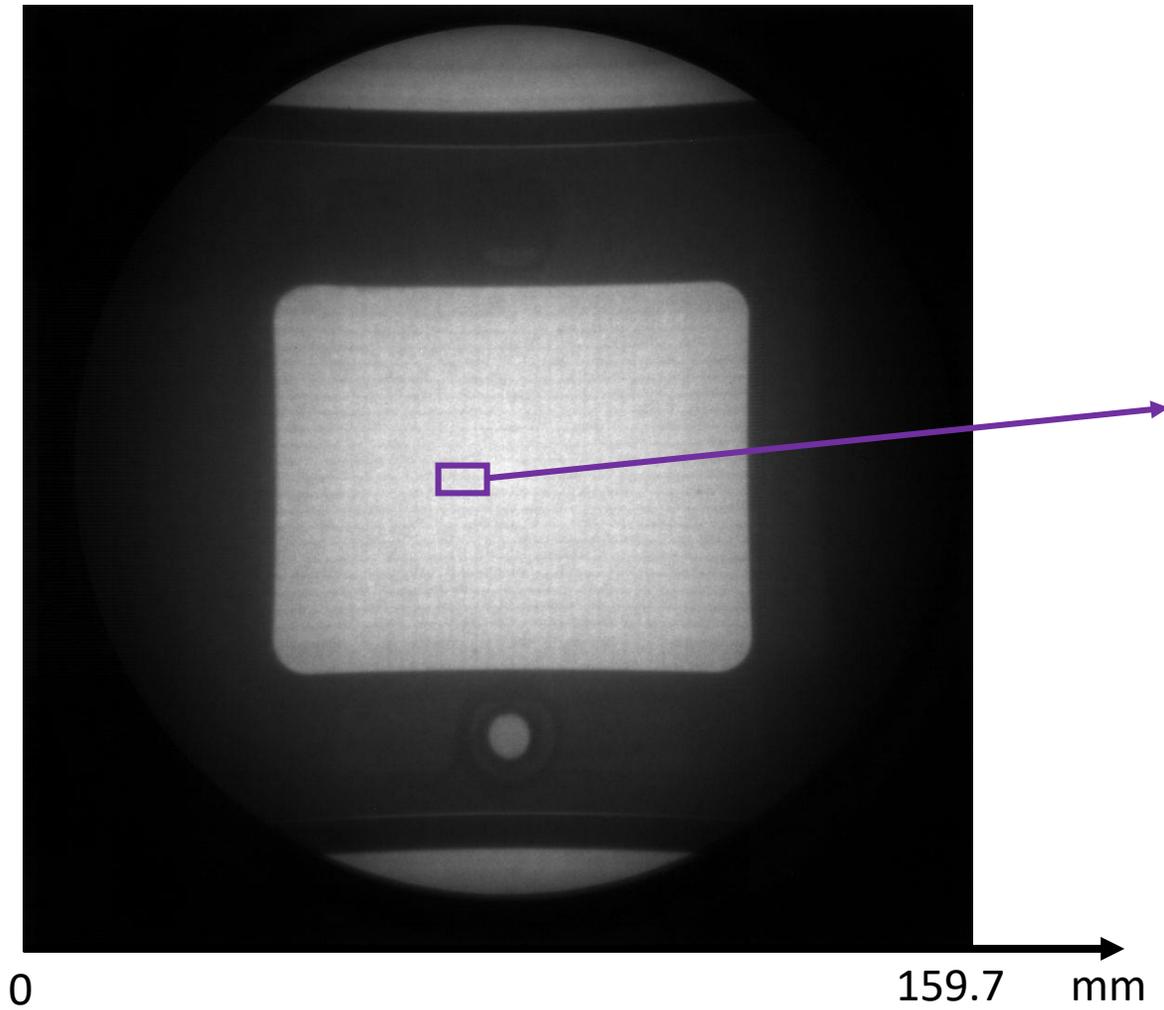
□ 中性子線照射方向のボイド率

$$\alpha(x, y) = 1 - \frac{\delta_L(x, y)}{\delta_{full}(x, y)} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{S_n(x, y) - O}\right)}{\ln\left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{S_{full}(x, y) - O}\right)} \Rightarrow \alpha(x, y) = 1 - \frac{\delta_L(x, y)}{\delta_{full}(x, y)} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{(S_n(x, y) - O) \times k_n}\right)}{\ln\left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{(S_{full}(x, y) - O) \times k_f}\right)}$$



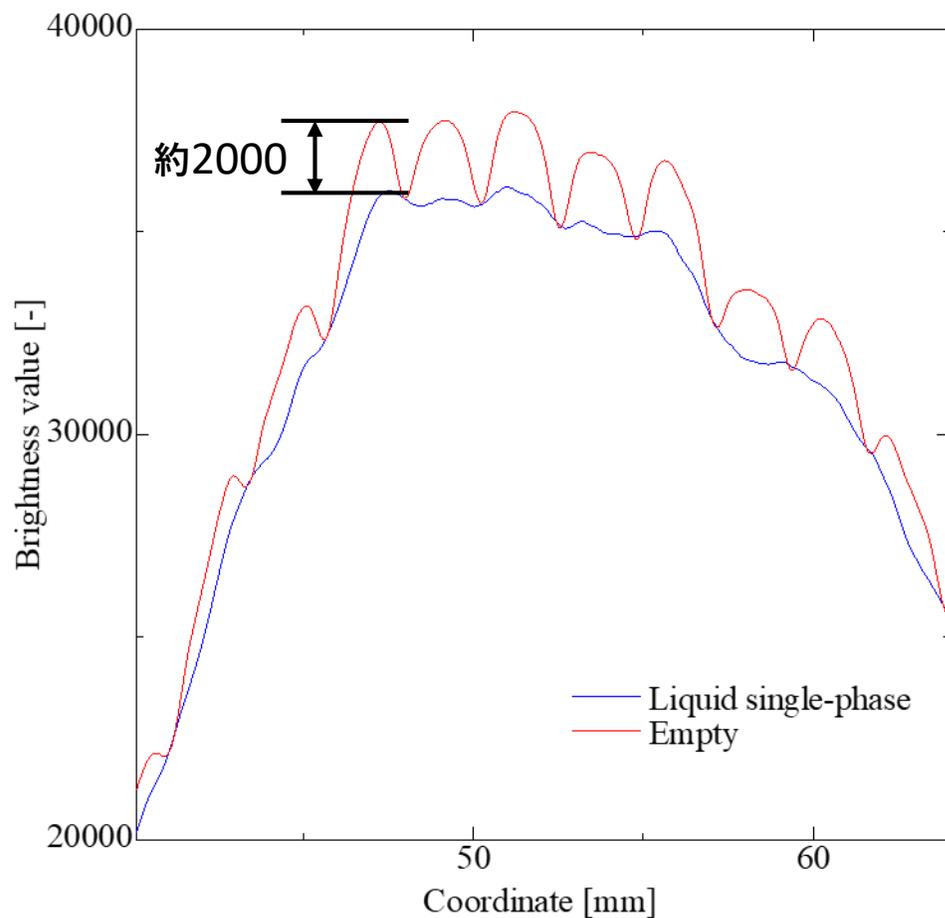
$k_e = 1.000$
 $k_n = 1.044$
 $k_f = 0.998$





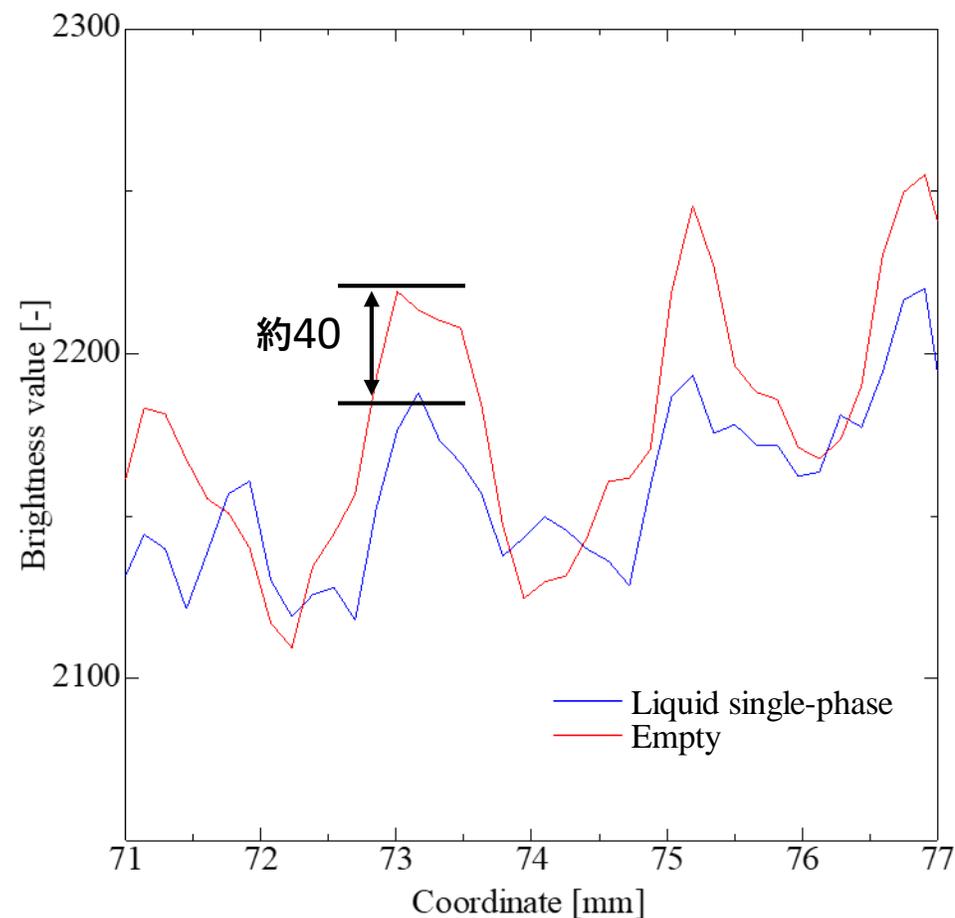
KUR

- 中性子束 : 1.7×10^7 [n/cm^2s]
- 輝度階調 : 16 bit (65536)
- 露光時間 : 15, 30 秒



JRR-3

- 中性子束 : 1.0×10^8 [n/cm^2s]
- 輝度階調 : 12 bit (4096)
- 露光時間 : 1/125 秒
- 撮影レート : 125 fps

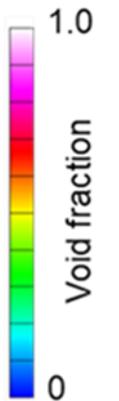
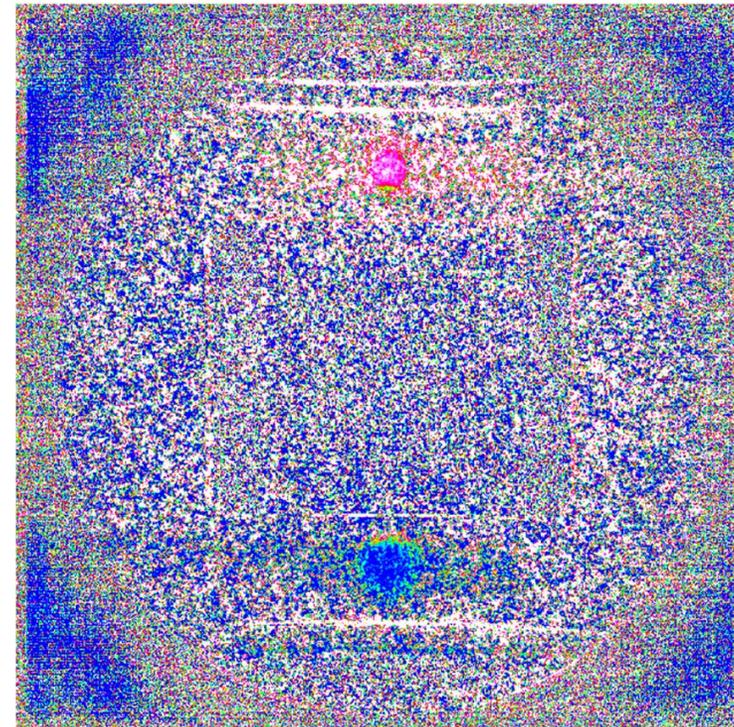
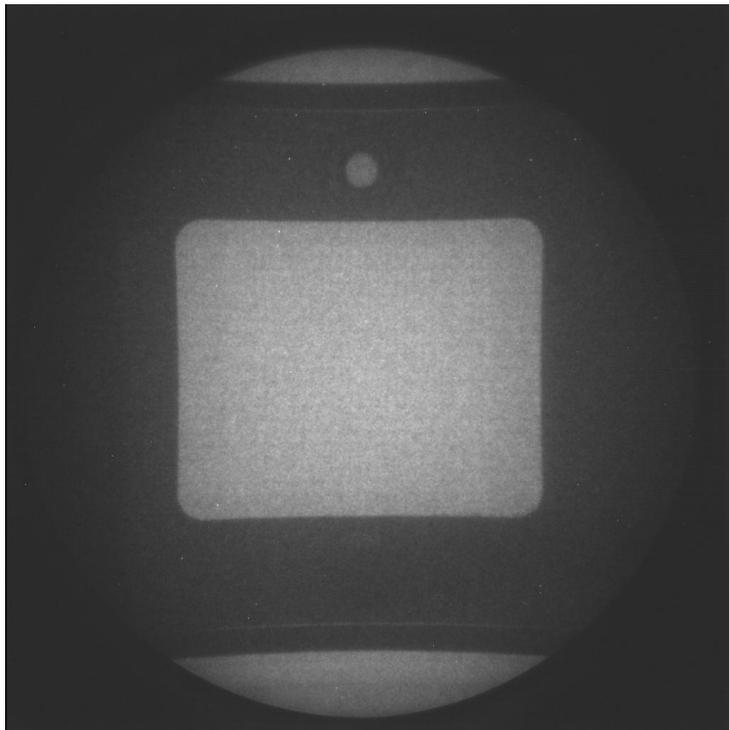


撮影条件

- 画像サイズ：1024×1024 pixel
- 画素寸法：155.8 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
- 輝度階調：12 bit (4096)
- 露光時間：1/125 秒
- 撮影レート：125 fps

実験条件

- 冷媒質量流束 101.4 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$
- 冷媒出口クォリテイ $x_{\text{out}} = 0.979$
- 加熱媒体入口温度 70.0 $^{\circ}\text{C}$
- 加熱媒体質量流束 2949.9 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$

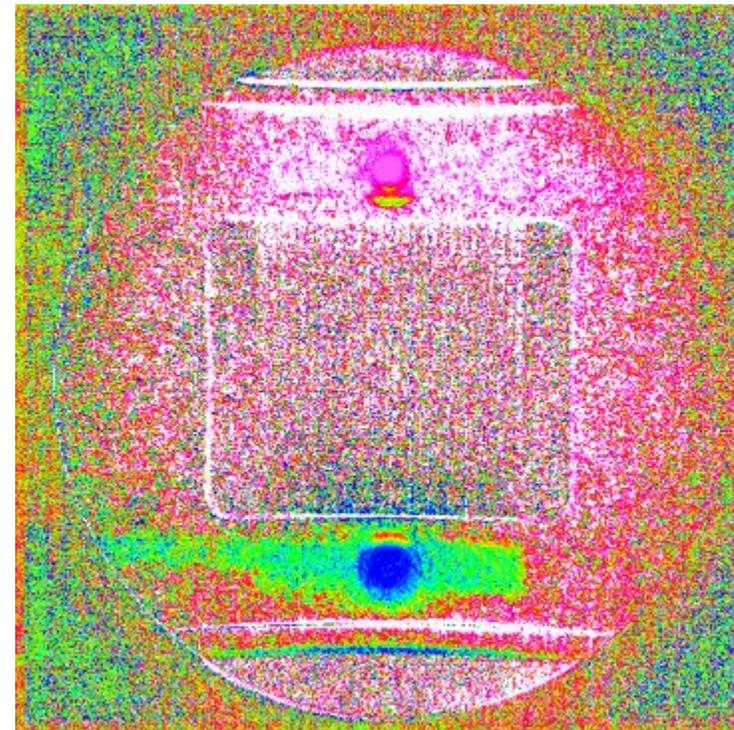
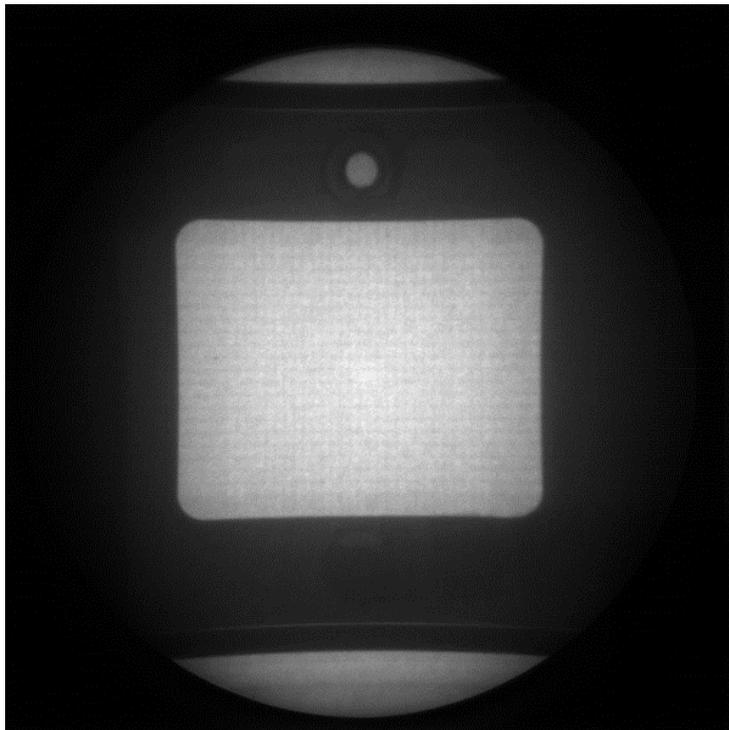


撮影条件

- 画像サイズ：1024×1024 pixel
- 画素寸法：155.8 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
- 輝度階調：12 bit（4096）
- 露光時間：1/125 秒
- 撮影レート：125 fps

実験条件

- 冷媒質量流束 101.4 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$
- 冷媒出口クォリテイ $x_{\text{out}} = 0.979$
- 加熱媒体入口温度 70.0 $^{\circ}\text{C}$
- 加熱媒体質量流束 2949.9 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$



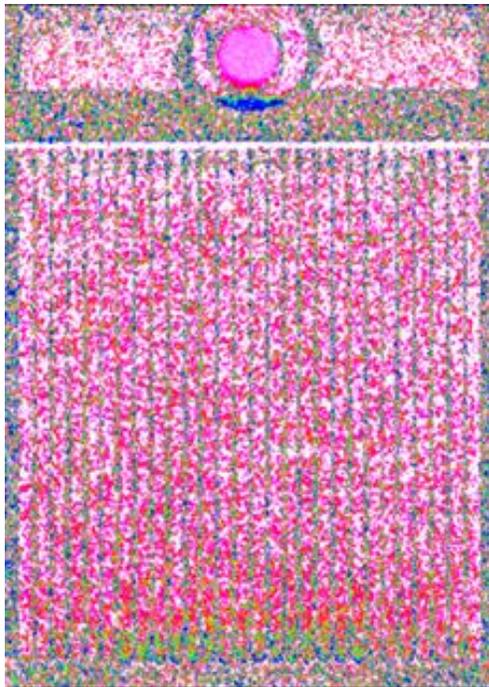
1.0
Void fraction
0

実験条件

- 冷媒質量流束 100 kg/(m²s)
- 冷媒出口クオリティ $x_{out} \cong 0.97$
- 加熱媒体入口温度 70.0 °C
- 加熱媒体質量流束 2947 kg/(m²s)

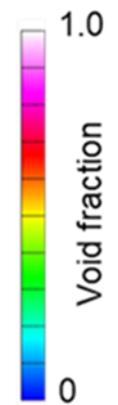
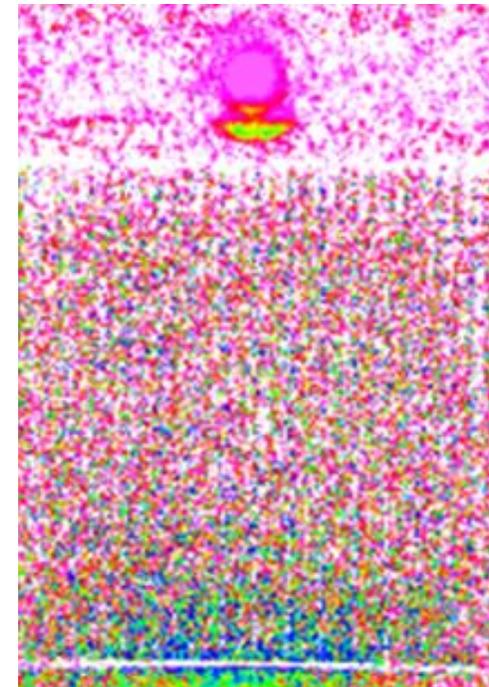
KUR

- 画素寸法：91 μm/pixel
- 輝度階調：16 bit (65536)
- 露光時間：15 秒



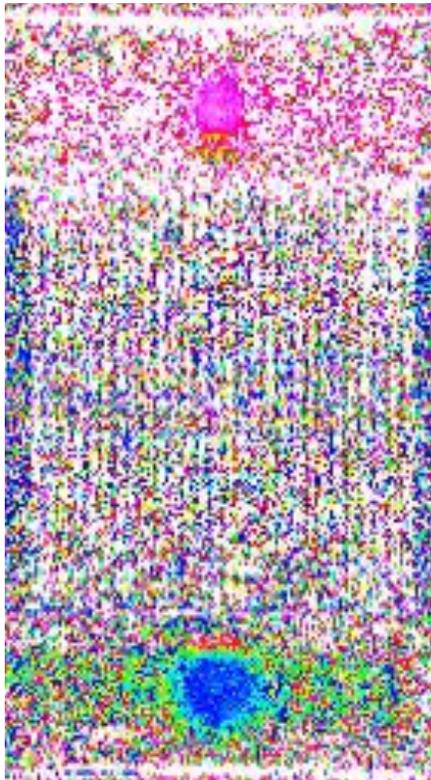
JRR-3

- 画素寸法：155.8 μm/pixel
- 輝度階調：12 bit (4096)
- 露光時間：1/125 秒
- 平均枚数：100枚



撮影条件

- ・ 露光時間：1/125 秒
- ・ 撮影レート：125 fps
- ・ 再生レート：25 fps
- ・ 再生秒数：10 s (250枚)



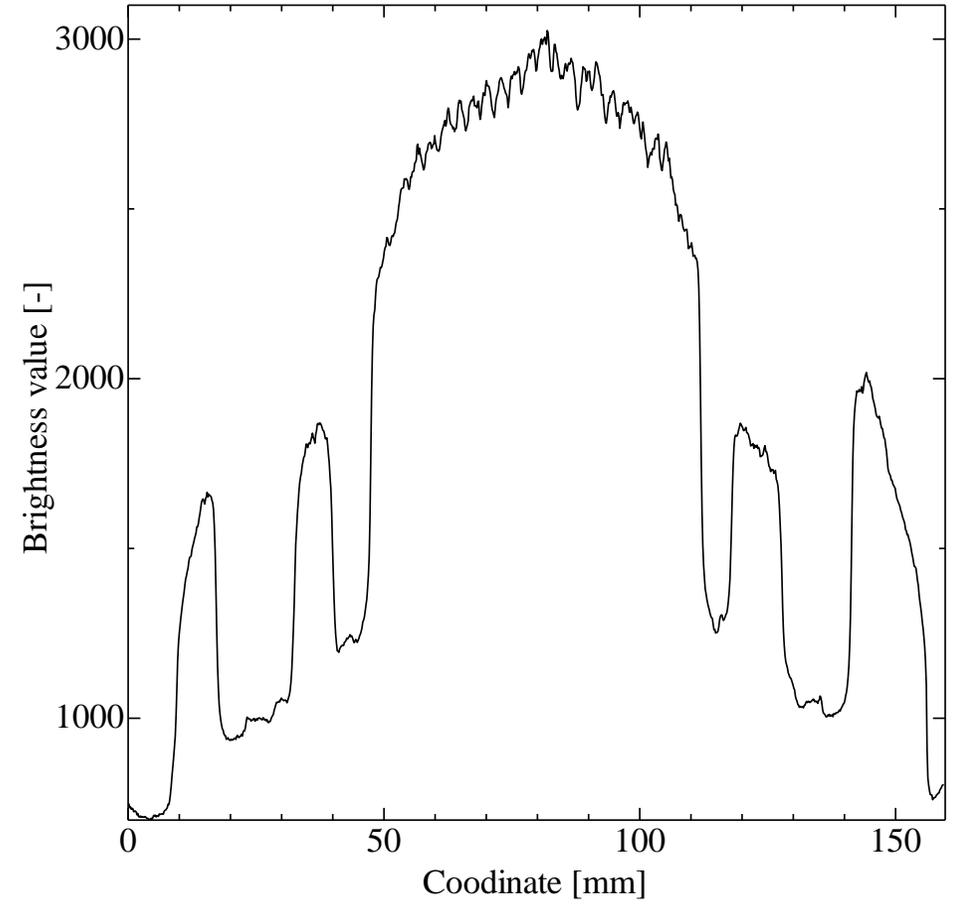
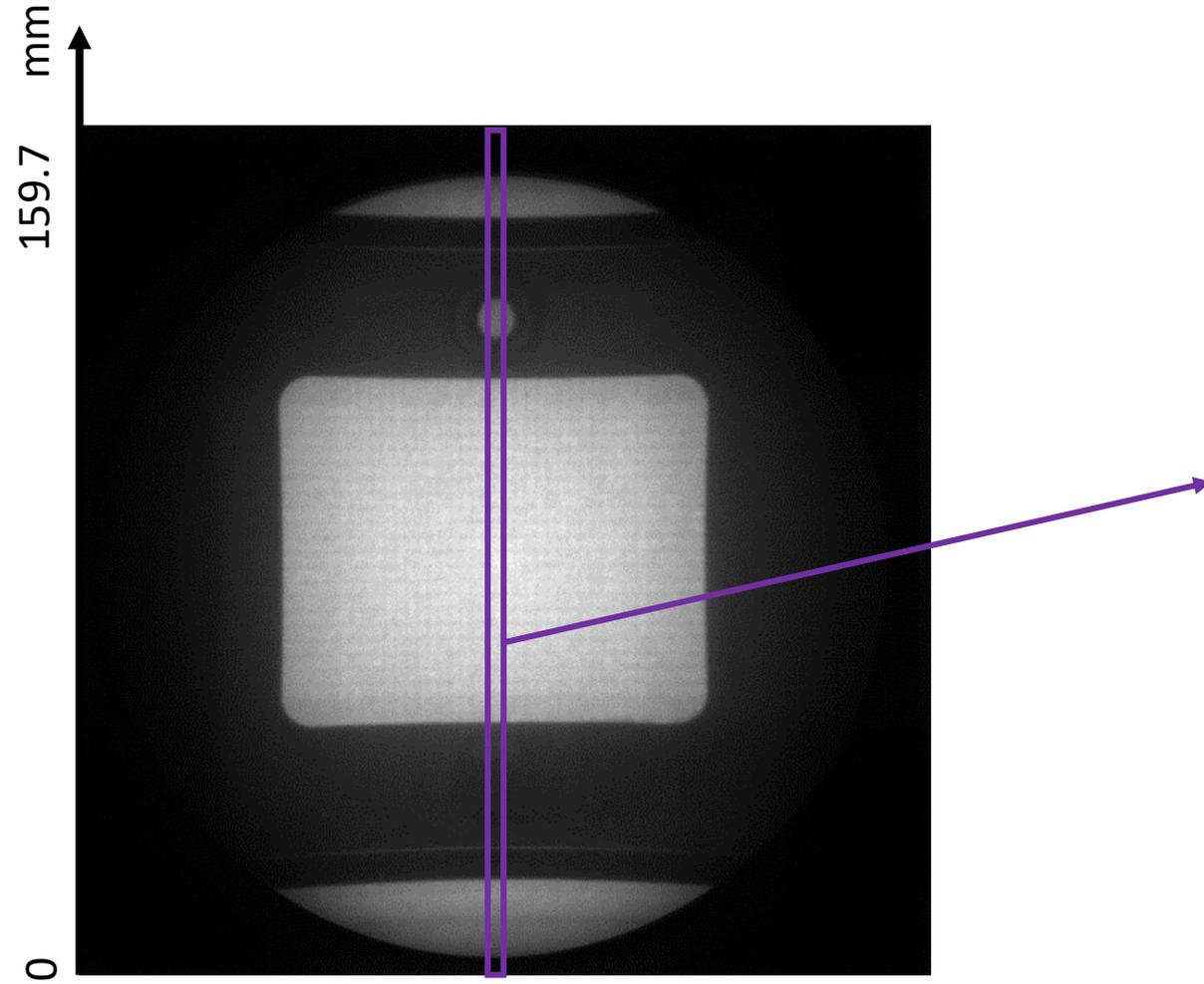
実験条件

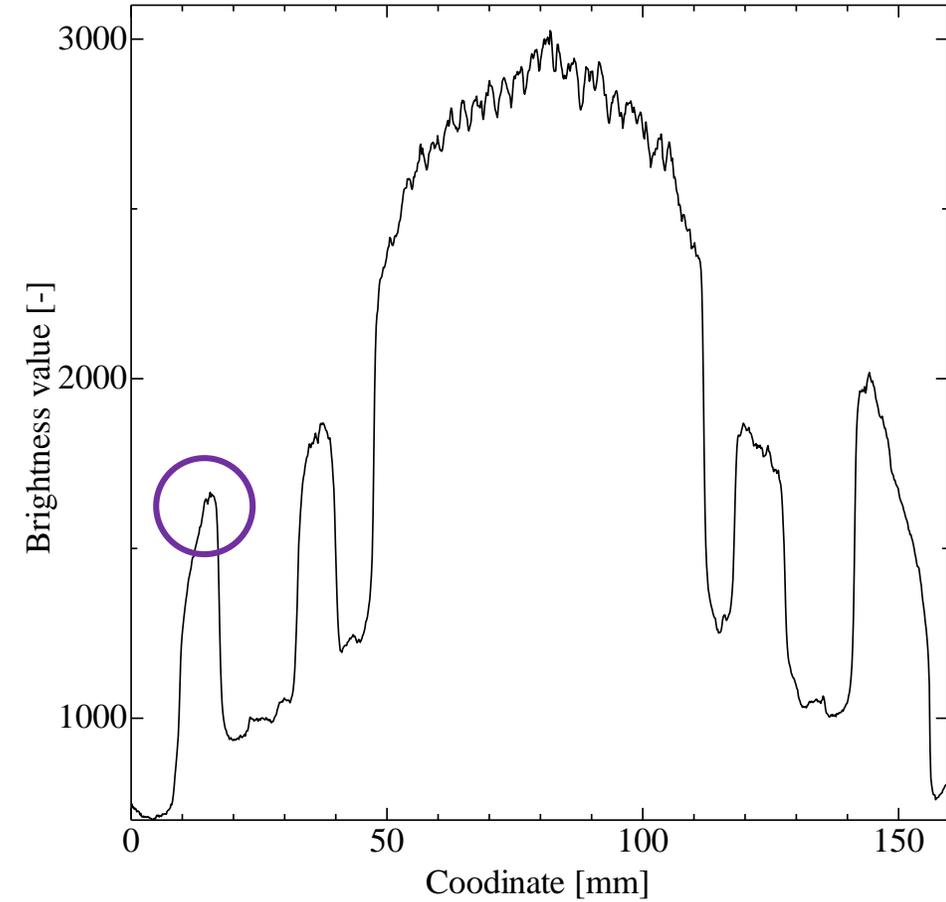
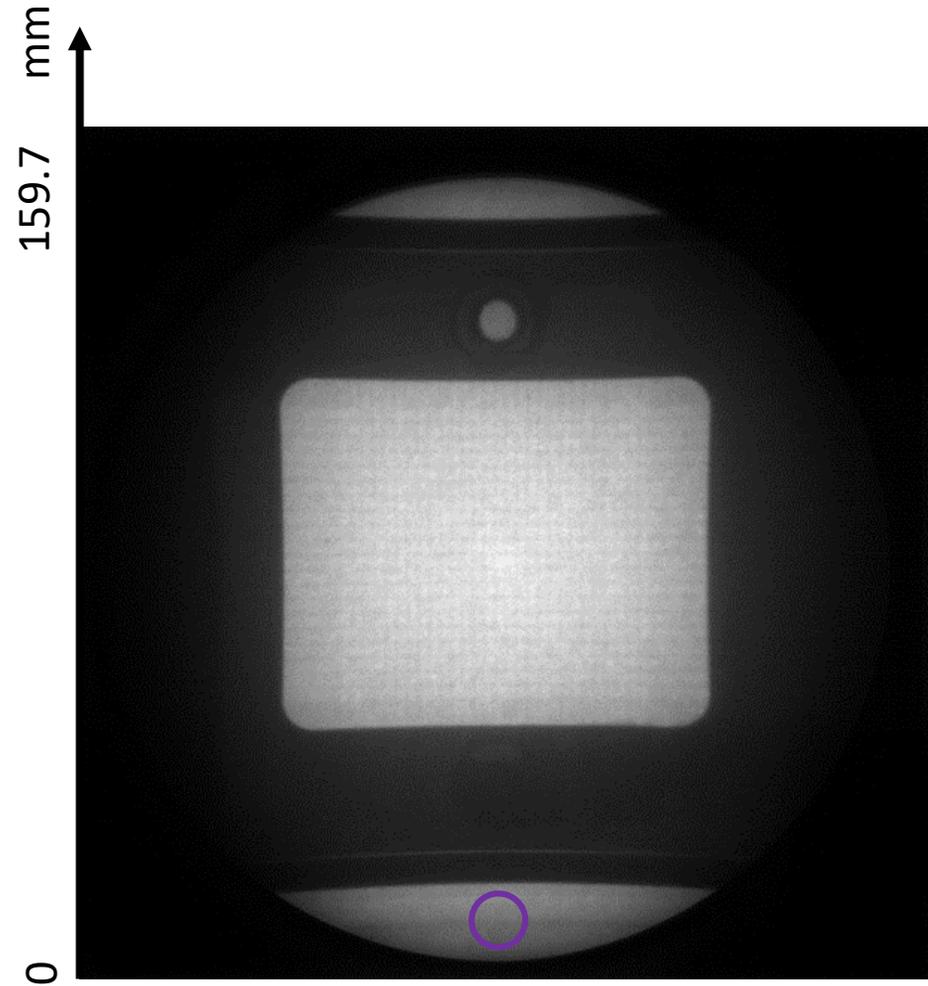
- ・ 冷媒質量流束 101.4 kg/(m²s)
- ・ 加熱媒体入口温度 70.0 °C
- ・ 冷媒出口クォリテイ $x_{out} = 0.979$
- ・ 加熱媒体質量流束 2949.9 kg / (m²s)

- ・ 時間分解能確保のため、平均枚数は3枚とした
- ・ 移動平均による平均
- ・ 元画像を250枚（再生秒数分）平均し、プロフィールを取ることで複数枚の画像に対して一律に補正係数かけた

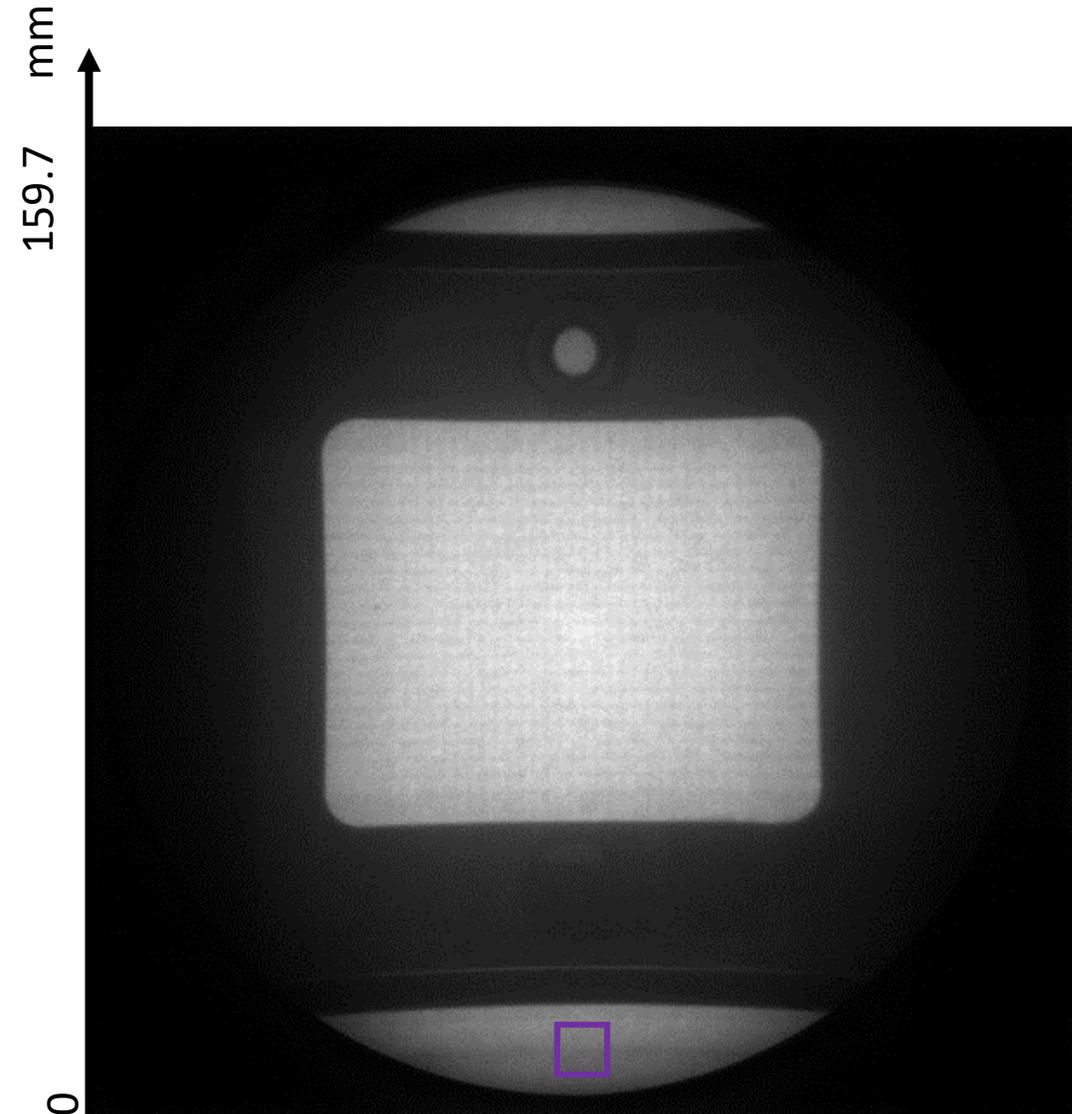
今後の課題

- ・ 移動平均枚数を増やして同様の処理を行う
- ・ 時間変動を考慮した補正を行う



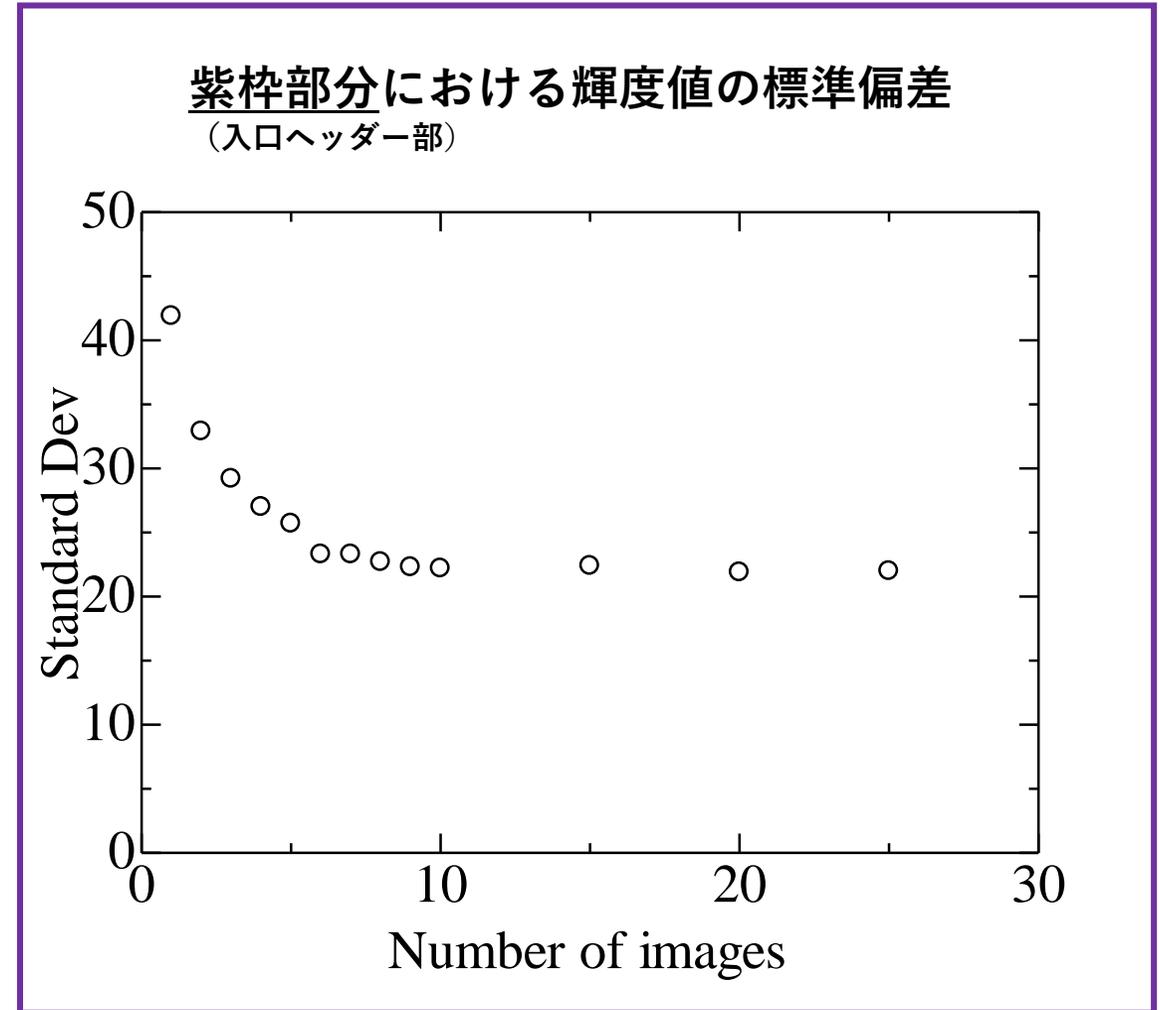
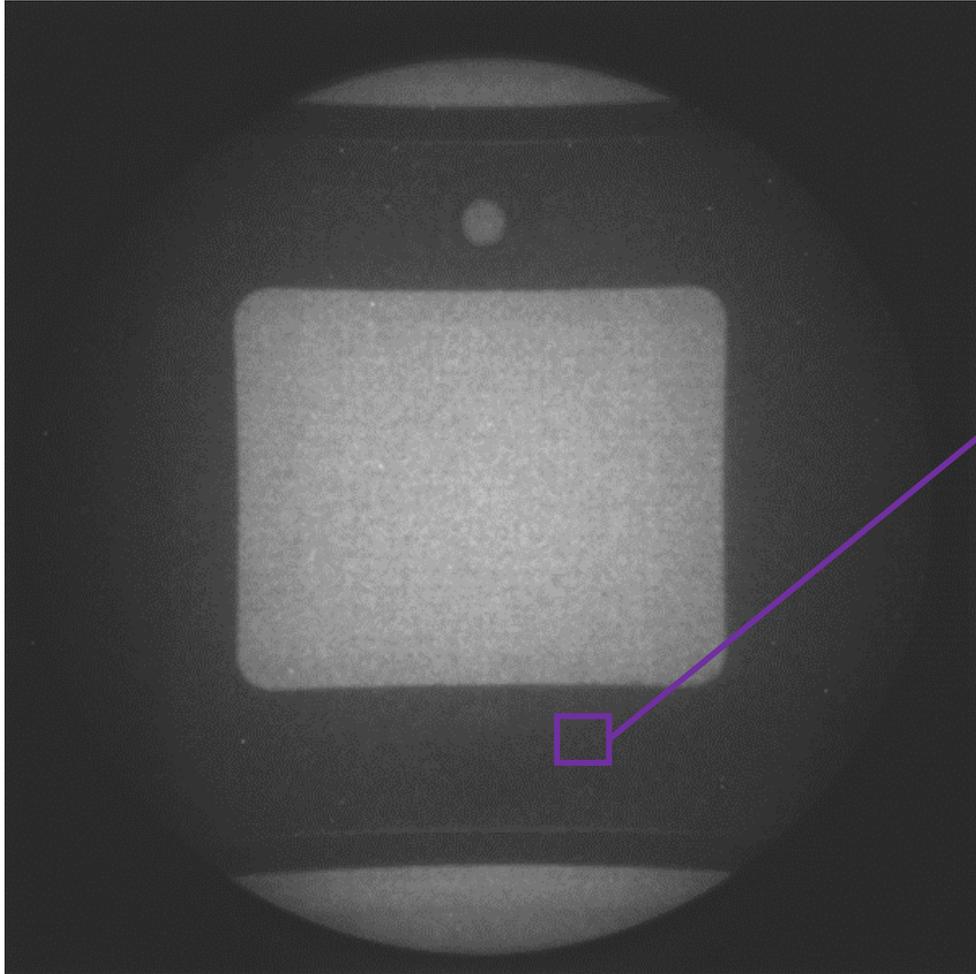


冷媒状態の影響を受けず、かつ輝度が比較的高い部分をピックアップ



Run number	冷媒状態	紫枠部分の平均輝度値	$\frac{(\text{空} - \text{暗電流})}{(\text{各条件} - \text{暗電流})}$
1	液単相	1937.3	1.017
2	二相流	1898.6	1.049
3		1942.4	1.013
4		1943.5	1.012
5		1945.3	1.010
6		1924.9	1.027
7		1933	1.020
8		1959.6	0.999
9		1969	0.992
10	空	1958.5	1.000
Dark		683.2	

プロファイルから合わせた補正係数
1.015
1.048
1.013
1.010
1.008
1.027
1.020
1.002
0.993
1.000



見たい現象を捉える時間分解能は確保しながらも、ノイズを落とすためにある程度の画像平均は必要