

## X線イメージングを用いた球充填層内のボイド率分布計測

Measurement of Void Fraction Distribution in a Sphere-Packed Bed Using X-Ray Imaging

山本 誠士郎<sup>\*\*</sup>,†      大平 直也<sup>\*\*\*</sup>      伊藤 大介<sup>\*\*\*</sup>      伊藤 啓<sup>\*\*\*</sup>  
YAMAMOTO Seishiro      ODAIRA Naoya      ITO Daisuke      ITO Kei

齊藤 泰司<sup>\*\*</sup>      今泉 悠也<sup>\*\*\*\*</sup>      松場 賢一<sup>\*\*\*\*</sup>      神山 健司<sup>\*\*\*\*</sup>  
SAITO Yasushi      IMAIZUMI Yuya      MATSUBA Kenichi      KAMIYAMA Kenji

**Abstract** In the safety study on a sodium-cooled fast reactor, it is assumed that the high-temperature fuel debris are formed because of a core disruptive accident. During the cooling of the fuel debris, gas-liquid two-phase flow can be generated in the debris due to the coolant boiling. To improve the prediction accuracy of the flow characteristics, detailed measurement of the gas-liquid two-phase flow in the debris bed is required. In this study, gas-liquid two-phase flow in a quasi-two-dimensional sphere-packed bed, which simulates the debris bed, is visualized by using X-ray imaging. The experimental results show that the local void fraction increases near the splitting section in the packed bed and decreases near the coalescence section.

**Keywords:** Sphere-packed bed, Sodium-cooled fast reactor, Two-phase flow, X-ray, Void fraction

### 1. 緒言

ナトリウム冷却高速炉の実用化に向けて、想定されるシビアアクシデントへの対策を講じることが必要である。炉心損傷事故では、熔融した炉心が熔融・固化して高温のデブリが形成される。事故の影響を最小限に抑えるためには、炉心領域に形成された燃料デブリ層を安定的に冷却することが重要となる。その際、冷却材であるナトリウムの沸騰により高温の燃料デブリ層で気液二相流が発生する可能性がある。数十年にわたり、デブリ層のような多孔質内の気液二相流は広く研究され、Lipinski モデルに代表される巨視的な圧力損失予測モデルが開発されてきた[1]。しかしこのようなモデルは、充填球の球径や形状、気液二相流の流動条件に依存して変化する複雑な力

学的メカニズムを十分に考慮できていない。圧力損失の予測精度向上のために局所的なボイド率分布や圧力損失に対する局所的な力学的メカニズムの影響を適切に評価し、モデルに組み込むことが必要だと考えるが、実験事実に基づいた微視的なモデル開発はほとんどなされていない。ゆえに圧力損失の予測精度を向上させるためには、デブリ層内の圧力損失や局所のボイド率など、気液二相流の詳細な計測が必要である。

既存の研究では、多くの場合、デブリ層を模擬した管内球充填層内の気液二相流に対して実験が行われてきた[2,3]。しかし、管内球充填層の場合、透明な管や充填物を用いたとしても、光の屈折・反射により管外から球充填層内部の二相流を観察することは困難である。先行研究では、X線

\* 2022.12.13 受付

\*\* 京都大学大学院エネルギー科学研究科

\*\*\* 京都大学複合原子力科学研究所

\*\*\*\* 日本原子力研究開発機構 大洗研究所

† Corresponding author: yamamoto.seishiro.36a@st.kyoto-u.ac.jp

イメージングを用いて球充填層内部の多孔質構造を可視化し、空隙率およびボイド率の計測を行った[4]。しかし、球充填層内部の局所的な流動の観察は依然困難である。そこで、球充填層内の二相流を可視化するため、管内球充填層を二次元的に切り出した擬二次元可視化装置を作製した[5]。これまでに、擬二次元可視化装置を用いた球充填層内部における流動様式の判別を行い、流動様式線図を作成した。また、狭間隙流路内の二相流に対する流動様式線図の Hibiki-Mishima 線図[6]と実験で得られた流動様式線図がよく一致することを明らかにした。球充填層内に形成される流路は急拡大と急縮小を繰り返すため、流路壁の粗度や濡れ性によって二相流の流動が大きく変化することが知られている[7]。急拡大・急縮小を繰り返す流路における局所的なボイド率分布は、球充填層内における気液二相流の局所的な力学的メカニズムを明らかにするために重要であるが、未だ解明されていない。そこで本研究では、球充填層内における気液二相流の流動を詳細に解明することを目的とし、擬二次元可視化装置を対象に X 線イメージングを行い、局所的なボイド率分布の計測を行った。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

Fig. 1 に擬二次元可視化装置の概略図を示す。装置は、内面に半球を規則的に配置した 2 枚 1 組の透明アクリル板で構成される (Fig. 1(a))。本研究では半球の直径  $d$  が 5 mm と 10 mm 二つの試験体を製作して実験を行った。2 枚の板を向かい合わせにすることで、二次元的な最密充填層を模擬できるように製作した (Fig. 1(b))。装置内の流路高さおよび幅は球径 5 mm の試験体でそれぞれ 200 mm、15 mm、球径 10 mm の試験体でそれぞれ 200 mm、30 mm である。流路の最大厚さはどちらも  $\sqrt{2/3}d$  で表され、5 mm 試験体で約 4.08 mm、10 mm 試験体で約 8.16 mm である。Fig. 2 に実験体系の概略図を示す。本研究での実験は、鉛直上向きの気液二相流を計測対象とする。液相はポンプ (NRD-08Z, IWAKI) を用いて循環させる。液相の流量計として、異なる計測レンジを持つ 2 種類のクランプオン式流量センサを用いた。各流量センサの計測レンジは 0~1 L/min (FD-XC1R2, KYENCE) および 0~3 L/min (FD-XC8R1, KEYENCE) である。ポンプによって押し出され、流量計を通

た液相は試験体入り口の気相流入口で気相と合流し、試験体内を気液二相流として流れる。気相流量の制御にはレンジの異なる 3 種類のマスフローコントローラーを用いた。各コントローラーの制御レンジはそれぞれ 0~0.5 L/min (FCM-9500-AI-H6, CKD)、0~5 L/min (FCM-0005AI-H6, CKD) および 0~50 L/min (FCM-0050AI-H8, CKD) である。試験体通過後の気液二相流は上部の液相タンク兼気液分離槽にて気液が分離され、液相はタンク内に保持される。その後タンクからポンプへつながった流出口を通して再び循環する構造となっている。また、上部液相タンク内の銅管内にチラーから冷却水を循環させることで、作動流体の水温は約 15 °C を維持した。

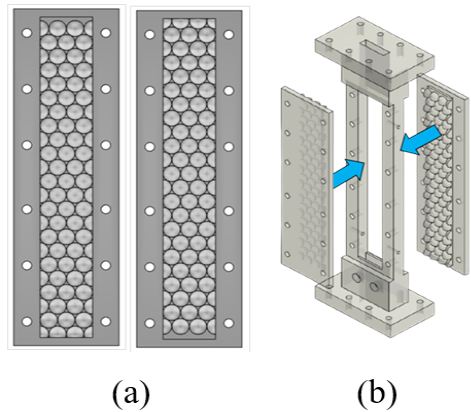


Fig. 1 Schematic of test section.

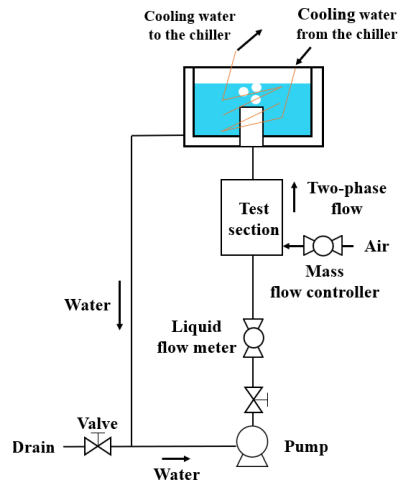


Fig. 2 Experimental set up.

## 2.2 実験方法

X線イメージング[8]による空隙率及びボイド率計測体系を Fig. 3 に示す。X線発生装置 (TRIX-150WE, Toreck) を使用し、管電圧は 120 kV 一定とした。X線源と鉛で遮蔽されたダクトの間に厚さ 1 mm の Cu フィルターを設置して、低エネルギー成分を除去した X 線を擬二次元可視化装置に照射した。Fig. 4 に示す X線イメージインテンシファイア (E5877CS-PIK, Toshiba 通称 X線 I.I.) で X 線を可視光に変換し、CCD カメラ (BU-53LN, BITRAN) で撮像した。本実験では 12 秒間の撮像を 5 回行うことで平均化画像を取得した。撮影時間は、流動の変化によって画像ごとにボイド率分布の偏りが生じない、十分長い時間を選択した。管電流は球径 5 mm の試験体で 1.7 mA、球径 10 mm の試験体で 0.5 mA である。この撮像系を用いて厚さの異なるアクリル板を対象として撮影を行い、同じピクセル位置での透過率の標準偏差から、 $\pm 0.3$  mm の測定誤差であることを確認した。

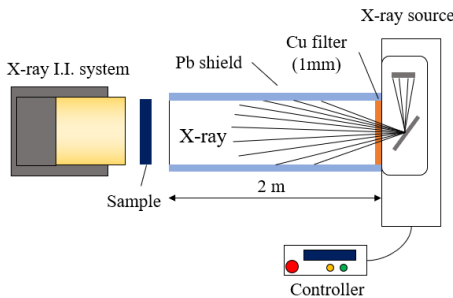


Fig. 3 X-ray imaging system.

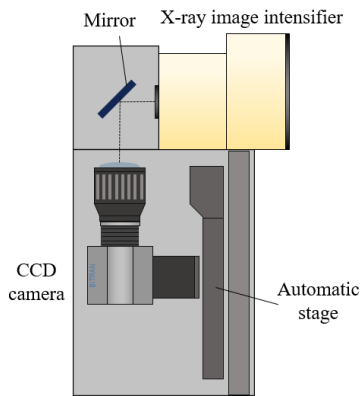


Fig. 4 X-ray image intensifier system.

まず、空隙率を測定するため、擬二次元可視化装置を水で満たし、X線イメージングによって水の厚さを測定した。空隙率  $\varepsilon$  は測定した各ピクセルの水の厚さ  $t$  と流路の最大厚さ  $t_{max}$  を用いて次の式(1)で表される。

$$\varepsilon = \frac{t}{t_{max}} \quad (1)$$

ここで、流路の最大厚さは 5 mm 試験体で約 4.08 mm、10 mm 試験体で約 8.16 mm である。Fig. 5 に測定範囲である流路単位構造を示す。Fig. 5(a)は球径 10 mm 試験体内の流路を示している。赤線で囲まれた範囲が Fig. 5(b)に示す流路単位構造である。装置内の流路断面は規則的に縮小と拡大を繰り返すが、本実験では最も流路が広がる部分を含んだ単位構造に着目して、空隙率分布とボイド率分布を測定した。なお、単位構造における空隙率分布とボイド率分布は流路内で同じ分布をもつと期待されるため、後で示す空隙率分布およびボイド率分布は 12 か所の単位構造におけるそれぞれの分布を平均した画像である。Fig. 6 に球径 5 mm および 10 mm 試験体における流路単位構造の局所空隙率分布を示す。平均空隙率は球径 5 mm 試験体で 0.268、球径 10 mm 試験体で 0.255 である。球径 5 mm 試験体の空隙率分布図内の点線で囲んだ部分は、3つの流路が合流する合流地点 (下側)、流路が再度3つに分かれる分流地点 (上側) をそれぞれ表している。流路単位構造において合流・分流地点が最も流動が複雑になると考えられるため、本実験ではこの地点の二相流に着目した。

水の厚さは式(2)に示す Lambert-Beer の法則より求めた。

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2)$$

ここで、 $x$  は透過方向厚さ、 $\mu$  は線減弱係数、 $I$  は透過 X 線強度、 $I_0$  は入射 X 線強度である。線減弱係数は物質と X 線のエネルギーに依存するため、使用する X 線発生装置によって異なる値を示す。このため本研究では、実験と同じ条件で様々な水の厚さに対する X 線の減衰を測定し、線減弱係数を求めた。

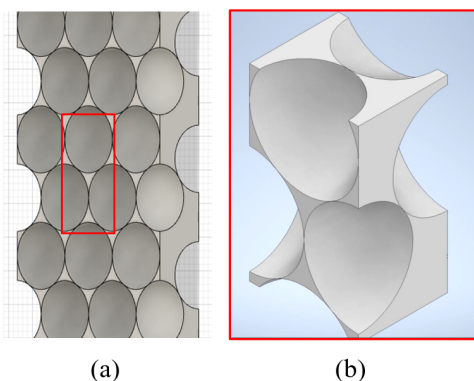


Fig. 5 Flow channels and flow unit structure.

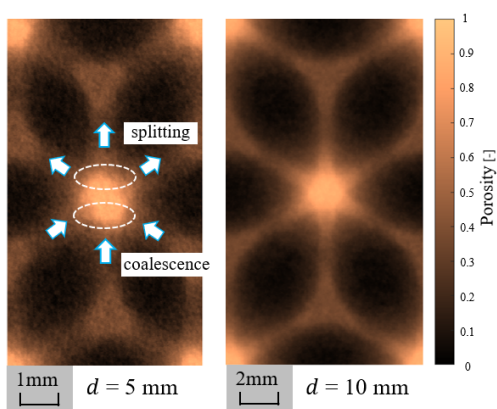


Fig. 6 Porosity distribution in flow unit structure.

次に、装置内に形成した鉛直上昇気液二相流を測定対象とし、X線イメージングによって可視化装置内のポイド率分布の計測を行った。X線透過方向の線平均ポイド率  $\alpha$  は式(3)によって求めた。

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{G_L - G_d}{G_2 - G_d}\right)}{\ln\left(\frac{G_L - G_d}{G_G - G_d}\right)} \quad (3)$$

$G_G$  は試験部が空気で満たされた状態で撮影した画像の輝度値 (Fig. 7 (a))、 $G_2$  は試験部に気液二相流が形成された状態で撮影した画像の輝度値 (Fig. 7 (b))、 $G_L$  は、試験部が水で満たされた場合の輝度値 (Fig. 7 (c))、 $G_d$  は暗電流成分の輝度値である。また、式(2)は X 線透過方向の線平均ポイド率であるが、球充填層のように場所によ

て X 線が透過する空隙の厚さが異なる場合、試験部全体の体積平均ポイド率を算出するためには X 線透過方向の空隙厚さで重み付けをする必要がある。そこで、各ピクセルにおけるポイド率と空隙厚さを用いて、式(4)より体積平均ポイド率  $\alpha_{ave}$  を求めた。

$$\alpha_{ave} = \frac{\sum \alpha_{i,j} x_{i,j}}{\sum x_{i,j}} \quad (4)$$

液相みかけ流速  $j_L$  を 0.01 m/s に固定し、気相みかけ流速  $j_G$  を 0.003 ~ 3 m/s の範囲で設定し計測を行った。図中に示す気相みかけ流速は可視化装置中心における圧力を用いて気相の密度補正を行った値である。

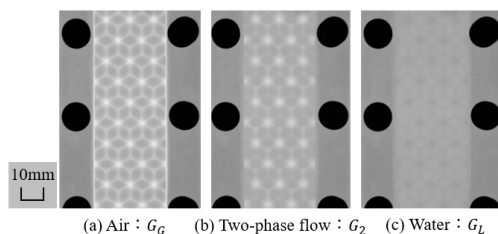


Fig. 7 Transmission image obtained by X-ray imaging ( $d = 10\text{mm}$ ).

### 3. 実験結果

Fig. 8、Fig. 9に球径 5 mm および 10 mm それぞれの試験体に対する液相みかけ流速  $j_L = 0.01$  m/s、 $j_G = 0.003, 0.1, 3$  m/s (設定値) それぞれのポイド率分布を示す。これらは Fig. 5(b)に示した流路単位構造におけるポイド率分布である。点線で囲んだ部分は、Fig. 6に示した、3つの流路が合流する合流地点(下側)、流路が再度3つに分かれる分流地点(上側)をそれぞれ表している。図より、どちらの試験体においても合流地点より分流地点でのポイド率が高くなっていることが分かる。これは複数の流路から流入した気泡が合流地点近傍で衝突するが気泡合体に要する薄膜化に時間を要するため、実際には気泡合体は下流部すなわち、分流地点の手前で起こっていると考えられる。これは、Fig.11に示すポイド率分布の最大値が中央から下流側にシフトしていることから妥当だと考えられる。

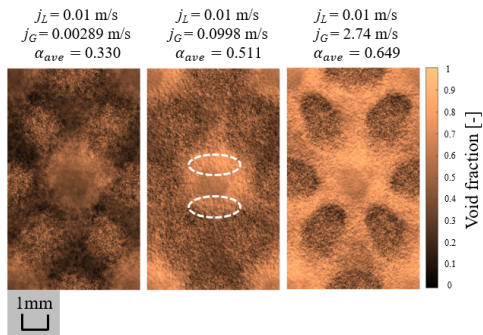


Fig. 8 Local void fraction distribution in the channel unit structure ( $d = 5$  mm).

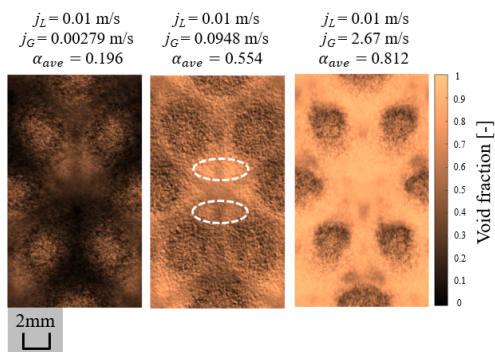


Fig. 9 Local void fraction distribution in the channel unit structure ( $d = 10$  mm).

次に、これらの画像における二次元分布について議論するにあたって、ポイド率画像では流路厚さが薄い部分での精度が低いことが問題となる。X線透過方向の流路厚さが非常に薄い部分では、水によるX線の減衰が小さく、式(2)における $G_G$ と $G_L$ の値がほぼ等しくなり、分母の値が0に近づくためである。このような領域ではX線ビーム強度のわずかなふらつきや撮像系の不確かさが原因となってポイド率が1を超えることがある。一方、ポイド率の精度が低くなる領域ではX線透過方向に対する流路厚さが薄いため、ポイド率と流路厚さの積である気相厚さすることで気相の分布を見やすくすることができる。したがって、以下では流路単位構造における気相厚さ分布について述べる。

Fig. 10、Fig. 11 に球径 5 mm および 10 mm それぞれの試験体に対する液相みかけ流速  $j_L = 0.01$  m/s、 $j_G = 0.003$ 、0.1、3 m/s それぞれの

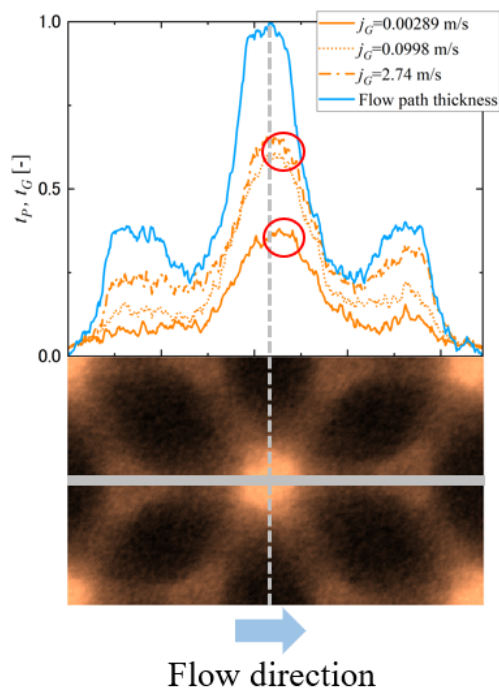


Fig. 10 Time averaged gas thickness profile ( $d = 5$  mm).

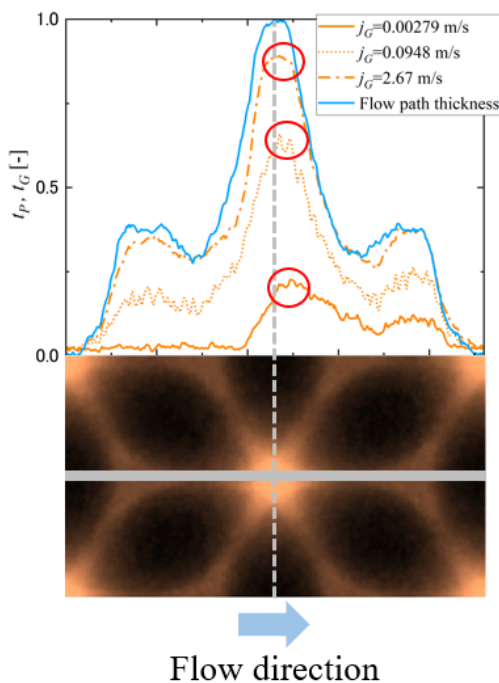


Fig. 11 Time averaged gas thickness profile ( $d = 10$  mm).

単位構造の中心線上における流れ方向の気相厚さ分布を示す。縦軸は無次元流路厚さ  $t_p^*$  (式(1)で示した空隙率  $\varepsilon$  と等しい) および次の式(5)で表される無次元気相厚さ  $t_G^*$  である。

$$t_G^* = \alpha \varepsilon \quad (5)$$

グラフの下の画像は横軸と位置を合わせた空隙率分布画像である。平均を取った領域の幅は両方の試験体に対して 15 pixel であり、球径 5 mm の試験体では 0.17 mm、球径 10 mm の試験体では 0.33 mm に相当する。擬二次元可視化装置を流れる鉛直上昇流に対して、図の左が上流側、右側が下流側を表している。グラフには橙色の実線、点線、一点破線でそれぞれ  $j_G$  の設定値が 0.003、0.1、3 m/s における無次元気相厚さ  $t_G^*$ 、水色の実線で無次元流路厚さ  $t_p^*$  が示されている。図中の赤丸で示しているように、球径 5 mm、10 mm の試験体どちらにおいても全ての流速条件で気相厚さのピークが下流方向へシフトしていることが分かる。これは単位構造の中心における流路の拡大部において、分流地点側に気泡の分布が偏っていることを示している。これはボイド率分布と同様、先に述べたように、合流地点で衝突した気泡の合体に必要な薄膜化に時間を要することが原因と考えられる。また、球径 10 mm の試験体と比較して、球径 5 mm の試験体では  $j_G = 3$  m/s の条件で流路厚さに対する気相厚さが薄くなっている。特に、流路単位構造の中央の流路が最も広がっている部分では、 $j_G = 0.1$  m/s と  $j_G = 3$  m/s で気相厚さにほとんど変化が見られない。この結果から、流速条件が同じであっても、球径による流路構造の違いが気相の挙動に大きな影響を与えることが明らかになった。

#### 4. 結論

本研究では、擬二次元可視化装置内に形成した鉛直上昇気液二相流を測定対象とし、X線イメージングによってボイド率分布の計測を行った。測定結果から、充填層内の分流地点では、合流地点よりもボイド率が高くなっていることが明らかになった。これは合流地点で衝突した気泡の合体に必要な薄膜化に時間を要することが要因であると考えられる。今後は、擬二次元可視化装置での測定結果と、実際の球充填層内二相流との比較

を行う必要がある。擬二次元可視化装置では奥行方向への流れが制限され、二次元的な流れが形成されるが、より三次元的な流れでは二相流の挙動が変化する可能性がある。よって、擬二次元可視化装置に奥行方向の構造を追加した装置を用いて、局所ボイド率分布の計測および比較を行い、球充填層内における二相流の流動メカニズムの解明を目指す。

#### Nomenclature

$d$	: particle diameter	[mm]
$G$	: gray level	[-]
$I$	: X-ray intensity	[-]
$j$	: superficial velocity	[m/s]
$t$	: thickness	[mm]
$x$	: distance in X-ray direction	[cm]

#### Greek letters

$\alpha$	: void fraction	[-]
$\varepsilon$	: porosity	[-]
$\mu$	: linear attenuation coefficient	[cm <sup>-1</sup> ]

#### Subscripts

0	: incident
2	: two-phase flow
ave	: volume average
$d$	: dark current
$G$	: gas phase
$i$	: pixel position in horizontal direction
$j$	: pixel position in vertical direction
$L$	: liquid phase
max	: maximum
$P$	: flow path

#### 参考文献

- [1] Lipinski R. J., A Model for Boiling and Dry-Out in Particle Beds, U.S. NUREG/CR-2646, SAND82-0765 R7 (1982).
- [2] Rayleigh, L., On the Instability of Cylindrical Fluid Surfaces, Phil. Mag., Vol. 34(207), 177- 180 (1892).
- [3] Seta, T. and Kono, K., Thermal Lattice Boltzmann Method for Liquid-Gas Two-Phase Flows in Two Dimensions, JSME Int. J. Ser. B., Vol. 47(3), 572- 583 (2004).
- [4] Ito, D., Ito, K., Saito, Y., Aoyagi, M., Matsuba, K. and Kamiyama, K., Estimation of Porosity and Void Fraction Profiles in a Packed Bed of Spheres Using X-Ray Radiography, Nuclear Engineering and Design, Vol.334, 90-95 (2018).
- [5] Yasugi, N., Odaira, N., Ito, D., Ito, K. and Saito, Y., Pressure Drop Evaluation Based on Two-Phase Flow Observation in Packed Bed System,

- Mechanical Engineering Journal, Vol. 9(4), 21-00437 (2022).
- [6] Hibiki, T. and Mishima, K., Flow Regime transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Narrow Rectangular Channels, Nuclear Engineering and Design, Vol.203, 117-131 (2001).
- [7] Crawford, C. W. and Plumb, O. A., The Influence of Surface Roughness on Resistance to Flow Through Packed Beds, J. Fluids Eng., Vol. 108(3), 343-347 (1986).
- [8] Heindel J. T., A Review of X-Ray Flow Visualization with Applications to Multiphase Flows, J. Fluids Eng., Vol.133(7), 074001 (2011).
-