遠心ポンプにおける気泡挙動の X 線可視化と数値シミュレーション*

X-Ray Radiography and Numerical Simulation of Bubble Behavior in Centrifugal Pump

伊 藤 啓** 熊 仁 東*** 伊 藤 大 介** 齊 藤 泰 司**
ITO Kei XIONG Rendong ITO Daisuke SAITO Yasushi

牛 房 裕 之† 篠 崎 健† 浅 井 勇 吾†
USHIFUSA Hiroyuki SHINOZAKI Masaru ASAI Yugo

Abstract Boiling heat transfer technology is considered as a promising way to remove the large amount of heat from electronic devices whose heat generation experiences a rapid increase recently. However, by employing the boiling heat transfer, there can be one concern that the pump efficiency may be reduced due to the vapor bubbles flowing into the coolant pump. Therefore, the occurrence mechanism of the pump performance degradation needs to be studied. In this study, a small-size centrifugal pump is selected and the pump performance degradation is investigated by measuring the liquid flow rate by changing the inlet gas bubble flow rate. In addition, the two-phase flow behavior in the pump is visualized and measured by using X-ray imaging. Numerical simulation is also performed to simulate the two-phase flow field around the pump impeller and the simulated results are compared with experiments. As a result, it is observed that the water flow rate decreases abruptly when the air flow rate exceeds a certain threshold value. In addition, both the X-ray imaging result and numerical simulation result shows that the accumulation of air bubbles occurs near the pump inlet, which may affect the water flow rate and in turn the pump efficiency.

Keywords: X-ray imaging, Numerical simulation, Centrifugal pump, Vapor bubble

1. 緒 言

近年の電子デバイスの小型化・集積化に伴って発熱（熱流束）も急速に増大しており、電子デバイスの効率的な冷却が大きな課題となっている。電子デバイスから放出される熱流束が非常に高くなると、一般的な強制対流熱伝達に基づく方法では十分な冷却が行えないことが懸念されており、相変化の潜熱を利用することで大きな除熱効果が得られる沸騰冷却が注目されている。ただし、沸騰による電子デバイス冷却においては、発生した蒸気（気泡）がポンプ内に流入し、ポンプ性能を低下させる可能性があるため、気泡流入時のポ

ンプ吐出流量低下挙動について調査し、ポンプ性能低下を防止できる適切な運転条件を知る必要がある。これまで、気液二相流状態における遠心ポンプ効率低下に関しては様々な研究[1-8]が行われており、ポンプ内二相流モデルの開発なども進められている。今後、ポンプ性能低下の詳細な条件を明らかにするためには、運転状態のポンプ内部における気液二相流動について情報を得る必要があると考えられるが、ボイドプローブのような一般的な測定技術は、インペラとの干渉のため、翼面近傍での計測に適用することは非常に困難である。一方、X 線ラジオグラフィ（イメージ

* 2020.10.30 受付

** 京都大学複合原子力科学研究所 〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2 丁目
TEL: (072)451-2300 FAX: (072)451-2600 E-mail: ito.kei.3n@kyoto-u.ac.jp

*** 京都大学大学院エネルギー科学研究科

† 三菱電機㈱先端技術総合研究所

ング) [9]による計測は、不透明な物体内部の流れ場を非接触で計測することが可能であり、遠心ポンプ内部の可視化に適していると考えられる。近年、X線イメージングによる気液二相流計測は広く行われており[10]、実際、遠心ポンプ内の局所密度分布計測にも適用されている[11–13]。しかし、回転翼近傍のような高速な気液二相流れに対するX線イメージングの技術は未だ発展途上であり、計測結果の信頼性を高めるために、得られたデータの比較・検討を行うことが必要不可欠である。

本研究では、小型遠心ポンプ内気泡挙動を調査し、ポンプ性能低下の発生原因について検討を行うため、X線イメージングによるポンプ内の可視化および数値解析による気液二相流挙動の把握を行う。まず、X線イメージングでは、ポンプ運転状態（インペラ回転状態）におけるポンプケーシング内の時間平均ボイド率分布を計測する。また、数値解析では、二流体モデルを用いてポンプ内気泡流の計算を行う。その際、ポンプ性能低下（ポンプ流量の急減少）を生じる条件におけるポンプケーシング内ボイド率分布の計算結果を、X線イメージングによって得られた結果と比較することにより、X線イメージングの計測結果と数値解析結果の妥当性検討を行う。

2. 実験装置

Fig. 1 に小型遠心ポンプ実験装置の概要を示す。実験装置は、気泡分離用のタンク、小型遠心ポンプ、気泡注入部、電磁流量計から成っており、作動流体は室温の水（液相）と空気（気相）である。タンクで気泡を分離された水は、流量計を通った後、気泡注入部において気泡が混入し、小型遠心ポンプで昇圧されてタンクに戻る。ポンプケーシングの内径は 60 mm、流入・流出配管の内径は 13.5 mm である。Fig. 2 に、実験で用いた小型遠心ポンプのインペラ領域を示す。インペラの外径は 40 mm であり、インペラ部底面からのインペラの最大高さが約 14 mm、ポンプ流入口高さが約 23 mm である。水（および空気）はポンプ回転軸に沿ってインペラ部の中心に流入し、インペラ部を通った後、回転方向に対して接線方向に流出する。X線イメージングを行う際は、ポンプの回転軸方向に対して、垂直または平行方向にX線を入射する。

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

Fig. 2 Impeller region of small-size centrifugal pump.

3. 水流量計測結果

まず、気泡流入によるポンプ性能低下特性を把握するため、ポンプ回転数を一定とした状態で空気流入量を徐々に増加させていった際の水流量を計測する。Fig. 3 にポンプ回転数（1750、2100 および 2650 rpm）の場合の水流量計測結果を示す。それぞれの回転数条件において、水流量は空気流量の増加に対して同様の傾向を示している。どの回転数条件においても、空気流量の増加によって水流量が急激に低下する箇所があり、例えば、2650 rpm の場合、空気流量が 0.19 L/min から 0.21 L/min に変化する際に、水流量が約 10 L/min 低下している。このような急激なポンプ性能低下は、システムの安定運転を妨げるものであり、防止すべきものである。したがって、本研究では、この

条件を対象として、ポンプ内気液二相流挙動を調査する。

Fig. 3 Change in water flow rate with increase in air flow rate.

4. X線イメージング

4.1 X線イメージングの原理

X線は、ポンプを構成する物質（樹脂など）や水、空気を透過するが、その際に異なる減衰率を示すため、その減衰率の違いを利用することにより、X線透過方向のボイド率を求めることができる。Fig. 4に、ポンプ内を水で満たした場合、（減衰が無視できる）空気で満たした場合、二相流状態の場合のX線イメージング画像を示す。ポンプ内部が水で満たされている場合が最も減衰率が高くなるため、ポンプ内部が暗くなっており、逆に、空気で満たされている場合は明るくなっている。二相流状態の場合、両者の間の明るさとなっている。このとき、ポンプ内部が水および空気で満たされている場合の透過X線強度を G_w および G_s とすると、これらの値は以下の式で計算できる。

$$G_s = C \exp(-\mu_s \delta_s) + Ofst. \quad (1)$$

$$G_w = C \exp(-\mu_s \delta_s - \mu_w \delta_w) + Ofst. \quad (2)$$

ただし、 C はX線源によって決まる定数、 μ_w および μ_s は水中およびポンプケーシングでのX線減衰係数である。また、 $Ofst.$ はX線強度のオフセット値であり、暗電流などによる影響（X線を照射しない状態においてカメラで得られる輝度）を表す。これらの式を用いて、ポンプ内部が水で満

たされている場合におけるX線透過方向の水領域の厚さ δ_w は、以下の式で計算できる。

$$\delta_w = \frac{1}{\mu_w} \ln \left(\frac{G_s - Ofst.}{G_w - Ofst.} \right) \quad (3)$$

また、二相流状態における透過X線強度 G_p は、次のように求まる

$$G_p = C \exp \{ -\mu_s \delta_s - (1 - \alpha) \mu_w \delta_w \} + Ofst. \quad (4)$$

ただし、 α はX線透過方向の平均ボイド率であり、これらの式を用いることで、以下のよう求まる。

$$\alpha = \ln \left(\frac{G_w - Ofst.}{G_p - Ofst.} \right) / \ln \left(\frac{G_w - Ofst.}{G_s - Ofst.} \right) \quad (5)$$

Fig. 4 Typical X-ray image.

本研究におけるX線イメージングの解像度は $100 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 、記録時間は $100 \sim 200 \text{ ms}$ であり、計測誤差低減のため、 1.0 秒分の画像を平均化してボイド率を算出している。また、その間の流量変動が小さいことを確認している。

4.2 ポンプ内ボイド率の計測結果

Fig. 5およびFig. 6に、ポンプ回転数 2650 rpm の条件において、X線イメージングによって得られたポンプ内のボイド率分布を示す。3章で述べた通り、ポンプ回転数を一定にして注入空気流量を増加させていくと、ある空気流量に達した際に急激な水流量の低下が生じる。Fig. 5は、急激な水流量の低下が起こる直前の空気流量条件（ 0.19 L/min ）における計測結果であり、Fig. 6は、急激な水流量の低下が起こった直後の空気流量条件（ 0.21 L/min ）における計測結果である。急激な流量低下を生じる直前の条件（空気流量 0.19

L/min) では、ポンプ流入口のエッジ部近傍に高いボイド率領域が形成されているが、その他の領域ではボイド率は低い値となっており、気泡の蓄積は見られない。一方、水流量低下後の条件（空気流量 0.21 L/min）では、インペラ部全体にわたって高いボイド率が観測され、インペラ部（翼と翼の間隙）に気泡が蓄積し、回転翼面から水へのエネルギー伝達を阻害していると考えられる。実際、Fig. 7 に示す通り、水流量の急激な低下を生じる空気流量において、インペラ領域の平均ボイド率が急激に上昇している。このことから、ポンプ効率低下は、インペラ部における急激な気泡蓄積が引き起こしている可能性が高い。

Fig. 5 Beam-line averaged void fraction by X-ray imaging just before abrupt reduction in water flow rate: (a) Side view and (b) Top view.

Fig. 6 Beam-line averaged void fraction by X-ray imaging just after abrupt reduction in water flow rate: (a) Side view and (b) Top view.

Fig. 7 Change in averaged void fraction in impeller region with increase in air flow rate.

5. 数値解析

5.1 解析条件

本研究では、汎用流体解析ソフト FLUENT 15.0 の二流体モデルを用いて、ポンプ内気泡流の解析を行う。その際、水および空気は非圧縮性流体として取り扱い、気泡抵抗計算に用いる気泡径は、気泡注入口径に基づき 4.0 mm とする。また、乱流モデルには RSM $k-\varepsilon$ モデル、圧力-速度の Coupling には Phase-coupled SIMPLE 法を用い、時間刻み 2.0×10^{-4} s で定常状態に至るまで計算を実施する。対流項の離散化には、1 次精度風上差分を適用する。

Fig. 8 に、解析格子を示す。解析格子は、約 150,000 個の非構造六面体セルサイズで構成され、インペラ領域などの領域の格子解像度は約 0.1 mm とする。また、インペラ領域には Multiple Reference Frame モデルを適用することにより、実際にインペラ部を回転させるのではなく、インペラ部内の流体に回転運動に基づく力を付与することによって回転運動を模擬する。

数値解析は、ポンプ回転数 2650 rpm において、実験で水流量の急激な低下を生じた直後の条件（水流量 10.61 L/min および 空気流量 0.20 L/min）を対象として実施する。

Fig. 8 Simulation mesh of centrifugal pump.

5.2 解析結果

Fig. 9 に、ポンプ中心軸を通る垂直断面内のボイド率分布を示す。ポンプ流入口のエッジ部近くにおいて高いボイド率の領域が形成されており、この領域に気泡が蓄積しやすい傾向があると考えられる。Fig. 10 に、ポンプ中心軸に垂直な断面内のボイド率分布を示す。ただし、 z はインペラ部底面からの垂直方向距離である。 $z = 5.0$ mm においては、翼の負圧面近傍のボイド率が 1.0 に近い値であり、ほぼ空気で覆われた状態となっている。同様の傾向は $z = 9.0$ mm においても観察される。 $z = 11.0$ mm の位置はインペラ上端とポンプケーシングの間隙にあたる領域であり、翼面間の高いボイド率領域が合体し、環状の高ボイド率領域が形成されている。

Fig. 9 Simulation result of void fraction distribution in vertical cross section.

6. X線イメージングと数値解析の比較

6.1 数値解析結果の平均化処理

4.2 節で示した X 線イメージングによって得られるボイド率分布は X 線透過方向の平均値であるのに対し、5.2 節で示した数値解析結果のボイド率分布は断面内の値であり、両者をそのまま比較することはできない。そのため、数値解析結果の平均化処理を行う必要がある。Fig. 11 に平均化処理の概念を示す。図中の矢印方向（ここではポンプ回転軸と平行方向）にボイド率の平均化を行うことで、X 線透過方向の平均ボイド率を計算する。その際、各格子セルの体積によって荷重平均を行う。

(a) $z = 5.0$ mm

(b) $z = 9.0$ mm

(c) $z = 11.0$ mm

Fig. 10 Simulation result of void fraction distribution in horizontal cross section.

Fig. 11 Schematic of line-averaged void fraction calculation.

6.2 比較結果

Fig. 12 に、X 線イメージング結果と数値解析結果（平均化処理後）のボイド率分布の比較を示す。ポンプ回転数 2650 rpm において、急激な水流量の低下を生じた直後の条件（水流量 10.61 L/min および 空気流量 0.20 L/min）での比較結果である。数値解析結果のボイド率分布と比較して、X 線イメージング結果はやや低いボイド率の値となっているが、両者ともに、インペラ部において顕著なボイド率上昇（気泡蓄積）が見られる。これらのボイド率分布から半径方向のボイド率分布（周方向に平均化した値）を求めた結果を、Fig. 13 に示す。インペラ部（概ね、半径 10 mm から 20 mm の領域）において高いボイド率の領域が形成されており、X 線イメージング結果と数値解析結果は概ね良い一致を示している。

ただし、本件では、比較的粗い解析格子を用いるとともに、二流体モデルによって気液二相流を計算しているため、特に高ボイド率領域における解析精度には改善の余地があると考えられる。今後、高精度な二相流モデルを用いた詳細解析を行うことにより、ポンプ内の気液二相流挙動（特に気相蓄積挙動）を明らかにしていく予定である。

7. 結 言

遠心ポンプ内に気泡が混入した場合の性能低下メカニズムについて調査するため、X 線イメー

Fig. 12 Comparison of void fraction distribution just after abrupt reduction in water flow rate: (a) X-ray imaging result and (b) Simulation result.

Fig. 13 Comparison of void fraction in impeller region.

ジングを用いて運転状態のポンプ内のボイド率分布を測定するとともに、数値解析によってポンプ内気泡流挙動を評価した。その結果、ポンプ効率低下が発生したとき、気泡がポンプ流入口のエッジ部近くに蓄積する傾向があり、また、流量低下時において、インペラ部のボイド率が高い値を示すことが分かった。これらの気泡の蓄積がポンプ入口条件に影響し、ひいてはポンプ効率を低下させると考えられる。どのようなメカニズムによって気泡蓄積が生じるのか明らかにするためには、今後、ポンプ内部の気液二相流動をより詳細に調査する必要がある。

Nomenclature

G : intensity of transmitted X-ray [-]
 $Ofst.$: offset of X-ray intensity [-]

Greek letters

α : void fraction [-]
 δ : thickness of in X-ray direction [m]
 μ : X-ray attenuation coefficient [1/m]

Subscripts

s : solid material (e.g. pump casing)
 tp : two-phase flow
 w : water

参考文献

- [1] Murakami, M. and Minemura, K., Effects of Entrained Air on the Performance of a Centrifugal Pump:1st Report-Performance and Flow Conditions, Bull. JSME, Vol. 17, 1047-1055 (1974).
- [2] Murakami, M. and Minemura, K., Effects of Entrained Air on the Performance of a Centrifugal Pump:2nd Report-Effects of Number of Blades, Bull. JSME, Vol. 17, 1286-1295 (1974).
- [3] Minemura, K. and Uchiyama, T., Prediction of Pump Performance under Air-Water Two-Phase Flow Based on a Bubbly Flow Model, J. Fluids Eng., Vol. 115, 781-783 (1993).
- [4] Minemura, K., Uchiyama, T., Shoda, S. and Egashira, K., Prediction of Air-Water Two-Phase Flow Performance of a Centrifugal Pump Based on One-Dimensional Two-Fluid Model, J. Fluids Eng., Vol. 120, 327-334 (1998).
- [5] Sato, S., Furukawa, A. and Takamatsu, Y., Air-Water Two-Phase Flow Performance of Centrifugal Pump Impellers with Various Blade Angles, JSME Int. J. Ser. B, Vol. 39, 223-229 (1996).
- [6] Stel, H., Ofuchi, E., Sabino, R., Ancajima, F.,

- Bertoldi, D., Marcelino, N. and Morales, R., Investigation of the Motion of Bubbles in a Centrifugal Pump Impeller, *J. Fluids Eng.*, Vol. 141, 031203 (2019).
- [7] Furukawa, A., Togoe, T., Sato, S. and Takamatsu, Y., Fundamental Studies on a Tandem Bladed Impeller of Gas/Liquid Two-Phase Flow Centrifugal Pump, *JSME Int. J. Ser. B.*, Vol. 55, 1142-1146 (1989).
- [8] Matsushita, N., Furukawa, A., Watanabe, S. and Okuma, K., Study on Design of Air-Water Two-Phase Flow Centrifugal Pump Based on Similarity Law, *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, Vol. 2, 127-135 (2009).
- [9] Theodore, J. and Heindel, A., Review of X-Ray Flow Visualization with Applications to Multiphase Flows, *J. Fluids Eng.*, Vol. 133, 074001 (2011).
- [10] Jung, S. Y., Parka, H. W. and Lee, S. J., Simultaneous Measurement of Bubble Size, Velocity and Void Fraction in Two-Phase Bubbly Flows with Time-Resolved X-Ray Imaging, *J. Synchrotron Radiat.*, Vol. 21, 424-429 (2014).
- [11] Hassan, W., Legoupil, S., Chambellan, D. and Barre, S., Dynamic Localization of Vapor Fraction in Turbo Pump Inducers by X-ray Tomography, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 55, 656-661 (2008).
- [12] Fischer, F., Hoppe, D., Schleicher, E., Mattausch, G., Flaske, H., Bartel, R. and Hampel, U., An Ultra Fast Electron Beam X-ray Tomography Scanner, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 19, 094002 (2008).
- [13] Duplaa, S., Coutier-Delgosha, O., Dazin, A. and Bois, G., X-Ray Measurements in a Cavitating Centrifugal Pump during Fast Start-Ups, *J. Fluids Eng.*, Vol. 135, 041204 (2013).
-