

PS-25 高圧水中条件における気泡発生とその計測

海洋開発系 * 中島 康晴、山本 譲司
 横浜国立大学 今井 せいら、村井 基彦

1. はじめに

我が国の排他的経済水域（EEZ）には、海底熱水鉱床やメタンハイドレートなどの非在来型エネルギー・鉱物資源が賦存することが知られており、その開発を推進するため、海洋基本計画に基づき、様々な研究開発が進められている^{1,2)}。これらの資源の開発においては、鉱石の選別やメタンハイドレートからのガスの回収のように、高圧水中条件における気泡発生を取り扱う場合がある。鉱石から有用鉱物に富む鉱石粒子（精鉱）を選別する方法の1つである浮遊選鉱（浮選）では、微粉碎した鉱石粒子を含む固液混合物（スラリー）に空気を圧入して気泡を発生させ、気泡表面に付着した粒子を精鉱として分離する。著者らは、海底条件において鉱石を粉碎・選別する海底選鉱を提案し、そのための基盤的な技術の開発を行っているが³⁾、深海底のような高圧水中条件において浮選に適するとされる直径数ミリメートル程度の気泡を発生させる気泡発生手法、並びに気泡径の計測手法の開発は重要な研究課題である。本稿では、小型の高圧実験装置を用いて高圧水中条件において微細な単一気泡を発生させ、画像解析により気泡径を計測した研究について報告する。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

本研究で使用した実験装置の概要を図-1に示す。本装置は、観察窓付きの耐圧容器（以下、観察用耐圧容器と記す。最高使用圧力 40MPa）、圧力調整用の耐圧容器（以下、圧力調整用耐圧容器）、弁、配管等から構成されている。観察用耐圧容器には外径 0.8mm の毛細管ノズルが挿入されている。観察用耐圧容器内に水を充填し、毛細管ノズルから空気を圧入することにより気泡を発生させる。空気の流量はニードル弁により調節することができる。

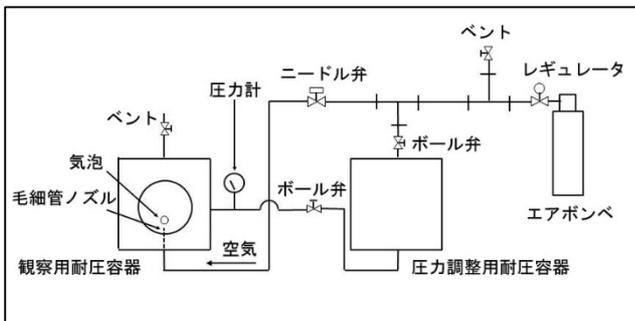


図-1 実験装置の概要

2.2 実験方法

実験では、観察用耐圧容器及び圧力調整用耐圧容器に清水を充填して密閉し、エアポンプの圧力を用いて圧力調整用耐圧容器から観察用耐圧容器に水を圧入して観察用耐圧容器内を所定の圧力まで加圧した後、毛細管ノズルから空気を徐々に圧入して微細な単一気泡を発生させた。気泡発生の様子をマイクロスコープカメラ（キーエンス製 VHX-5000）により観察し、画像データの取得を行った。実験に使用したマイクロスコープカメラ及びズームレンズの主な仕様等を表-1に示す。観察用耐圧容器内の圧力条件は 2.4MPa（ゲージ圧）までとした。

表-1 マイクロスコープカメラ及びズームレンズの仕様

名称	型式等	主な仕様
マイクロスコープカメラ	Keyence VHX-5000	静止画及び動画の撮影が可能
ズームレンズ	Keyence VH-Z00	倍率：×5~50 観察距離：95mm

3. 解析手法

気泡のサイズを表す気泡径には様々なものが提案されているが、本研究では、図-2に模式的に示す、Image Shearing Diameter⁴⁾と呼ばれる径を用いることとした。これは、元の画像のコピーを、元画像と丁度接するところまで平行移動させ、その移動距離を径とするものである。本研究では、マイクロスコープカメラで取得した画像データ（カラー画像）から色彩の情報を消去してモノクロ化し、適当な閾値を設定して二値化し、輪郭を取りだしたものを元画像とした。これを水平方向及び鉛直方向に平行移動させ、得られた Image Shearing Diameter をそれぞれ横直径 (d_1) 及び縦直径 (d_2) とした⁵⁻⁶⁾。

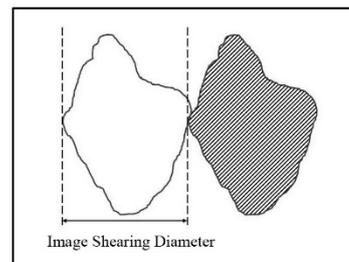


図-2 Image Shearing Diameter の概要

気泡の形状を図-3に示す回転楕円体と仮定すると、 d_1 及び d_2 から、回転楕円体と等しい体積を有する球（体積等価球）の直径（ d_{eq} ）は次式で求められる。

$$d_{eq} = \sqrt[3]{d_1^2 d_2} \quad (3.1)$$

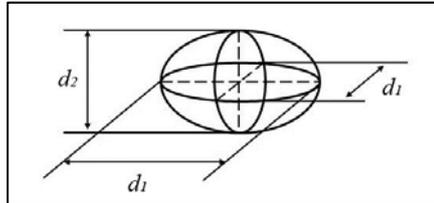


図-3 回転楕円体の横直径（ d_1 ）及び縦直径（ d_2 ）

4. 結果及び考察

マイクロスコープカメラで撮影した高圧条件下における気泡発生の様子を図-4（カラー画像をモノクロ化し、明るさを調整したもの）に示す。本図は圧力条件 2.4MPa における画像であるが、他の圧力条件でも気泡発生の様子は同様であった。

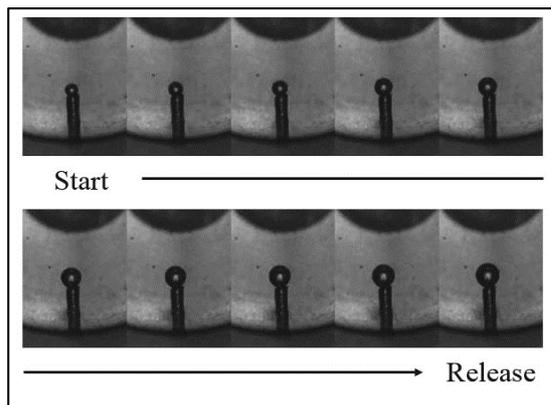


図-4 高圧条件下における気泡発生の様子
（圧力条件 2.4MPa, モノクロ化・明るさ調整済み）

ノズルから離脱する直前の気泡を対象として d_1 及び d_2 を計測し、 d_{eq} を算出した。サイズはノズルの外径を基準とした。各圧力条件において 25 個の気泡を対象として計測を実施し、平均気泡径（ $\overline{d_{eq}}$ ）を算出した。その結果を図-5に示す。図中のエラーバーは標準偏差を示す。 $\overline{d_{eq}}$ は 1.5~1.7mm 程度であり、圧力の上昇とともに低下する傾向を示した。なお、ノズルから離脱したあとの気泡については鮮明な画像を取得できなかったが、シャッター速度を上げる等、撮影条件を改良することにより、取得できる可能性がある。

今回の実験では、画像解析における閾値の設定や輪郭の認識、画像の平行移動などの操作は、気泡の画像上での特徴をよりの確に捉えるため、手動で試行錯誤を行ったが、今後はこれまでの知見を踏まえつつ、操作の自動化をすることによ

り、気泡径計測の自動化、高速化を図ることができると期待される。

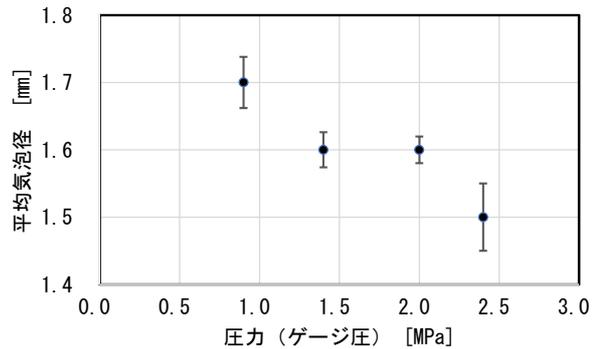


図-5 平均気泡径（ $\overline{d_{eq}}$ ）の計測結果

5. まとめ

小型の高圧試験装置を用いて高圧水中条件において微細な単一気泡を発生させ、画像解析により気泡径の計測を行った。マイクロスコープカメラを用いて取得した画像から、1.5mm 程度の気泡径を計測することができた。今後、画像解析の手順を自動化することにより、気泡径計測の自動化、高速化を図ることができると期待される。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 16H04609 の助成を受けたものです。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 上田哲士, 岡本信行: 日本周辺海域に分布する海底熱水鉱床の開発プロジェクトの概要, Journal of MMIJ, 第 131 巻第 12 号 (2015), pp. 610-613.
- 2) 松本良: 総説 メタンハイドレート-海底下に氷状巨大炭素リザーバー発見のインパクト, 地学雑誌, 第 118 巻第 1 号 (2009), pp. 7-42.
- 3) Nakajima, Y., et al., 2011, Concept of Seafloor Mineral Processing for Development of Seafloor Massive Sulfides, Proc. The ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, The Netherlands, OMAE2011-49981.
- 4) Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E.: Bubbles, Drops, and Particles (1978), Academic Press, pp. 18-19.
- 5) 今井せいら, 加藤俊司, 中島康晴, 村井基彦: 海底熱水鉱床開発のための気泡径計測の研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 26 号 (2018) .
- 6) Imai, S., Nakajima, Y., Murai, M., 2019, Experimental Study on Bubble Size Measurement for Development of Seafloor Massive Sulfides, Proc. The ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Scotland, OMAE2019-95186.