



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study of Nitrogen-Brine Two-Phase Flow Behavior under High-Pressure Condition [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	柴田, 尚人
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15361号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89672
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Shibata_Naoto_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 柴田 尚人

審査担当者 主査教授 澤和弘
副査教授 小崎完
副査特任教授 坂下弘人
副査准教授 三輪修一郎 (東京大学大学院工学系研究科)

学位論文題名

Study of Nitrogen-Brine Two-Phase Flow Behavior under High-Pressure Condition

(高圧条件における窒素-塩水系の気液二相流挙動に関する研究)

本学位論文は、海洋メタンハイドレートからの安定したガス生産の制御を目的とした、高圧条件における窒素-塩水系の気液二相流挙動に関する研究である。気体と液体が混合して流れる気液二相流は、気液界面で生じる相互作用により、複雑な流動・伝熱特性を示す現象であり、原子力をはじめとする多くの工業システムにおいて生じるため、その理解は学術的、工学的に極めて重要である。

メタンハイドレート開発促進事業では、日本周辺の海域に相当量の賦存が見込まれている海洋メタンハイドレートからのガス生産方法を開発している。これまでにメタンハイドレート海洋産出試験は2回実施され、減圧法による海洋ガスハイドレートからのガス生産に成功している。減圧法は、坑井内の海水を抽出して坑内を減圧し、ガスハイドレートを溶解してガスを生産する方法である。この方法では、ガス生産量が坑底圧に大きく依存するため、その制御が安定したガス生産のために重要で、また商業的に利用するためには、長期的なガス生産安定性の確保が必要である。坑底圧を安定に制御するためには、気液分離器、ポンプなどの坑内機器や制御機器の適切な仕様と設計が必要である。これらの機器を設計するためには、坑井内の流動挙動を考慮したプロセス条件を把握することが求められる。

本学位論文の研究は、坑井内の流動挙動を考慮したプロセス条件の把握に焦点を当てたもので、商業的な利用を見越した長期的な生産安定性の確保に向けて、気液分離器、ポンプなどの坑内機器や制御機器の適切な仕様と設計に有用な情報を提供するために、実験および解析に取り組んだものである。本論文は5章で構成されている。以下にその概要を示す。

第1章では、研究背景として海洋メタンハイドレートからのガス生産手法の開発と本研究の位置付け、本論文の構成について記述している。また、これまでの関連研究をレビューするとともに、未解決の課題の抽出・整理を行っている。

第2章では、気液二相流の基礎的な研究として、建設した高圧機器の実験装置で実験データを取得し、ボイド率と圧力損失のモデル化を行った。具体的には、実験で取得したボイド率と圧力損失を無次元化ドリフトフラックスモデルと二相流摩擦乗数に整理して、高圧または塩水条件の推算式を導出した。その結果、気泡流のガス速度は、上水条件で既存モデルと良い相関を示したが、塩水条件では全ての領域で低く、これは塩水の合泡抑制による気泡径の縮小で、流路内の気泡分布の均一化および気泡上昇速度の低下に起因する。また、二相流摩擦乗数は、上水条件で既存モデルと良

い相関を示し、高圧条件で減少することがわかった。

第3章では、客観的な流動様式の識別研究として、稀少な高圧条件の実験データで学習させた教師あり学習を活用した識別手法を確立し、出力される帰属確率から流動様式の定量化を行った。具体的には、ハイスピードカメラで撮影した実験の流動挙動の動画を Time-strip 法で1枚の画像に加工して、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) に学習および識別させることで遷移領域の流動様式を定量化した。その結果、教師あり学習の識別結果は既存モデルの遷移基準とよく一致しており、気泡流からスラグ流への遷移領域を定量的に示した。また、本研究結果から気泡流からスラグ流へ遷移するガス・液空塔速度が既存モデルの遷移基準より大きい速度であることが示唆された。

第4章では、学習する実験データのデータラベル数および質に依存しない識別手法を目指して、教師なし学習による分類を通じた識別手法を構築し、流動様式の定量化を行った。具体的には、Time-strip 法で得られた画像を主成分分析 (PCA) および混合ガウスモデル (GMM) に入力して画像を任意のクラス数に分類することで流動様式を識別し、同様の手法で遷移領域の流動様式を定量化した。その結果、教師なし学習の識別結果は既存モデルと良い相関にあり、気泡流からスラグ流への遷移領域を定量的に示し、教師なし学習で流動様式を定量化できることを示した。

第5章は、以上の章の結論として、本研究で得られた結果の要点を述べている。

これを要するに、著者は高圧条件における窒素-塩水系の気液二相流挙動を明らかにするとともに、坑井内の流動挙動を考慮したプロセス条件を把握できる基礎を築いたものであり、混相流工学の発展及び原子力をはじめとする多くの工業システムの設計に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。