

内22-50

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

Experimental and Modeling Studies for Gas-Liquid Two-Phase Flow  
in Slightly Inclined Pipes at Low- and High-Pressure Conditions

(低圧及び高圧条件下における緩傾斜管内  
気液二相流実験及びモデル化の研究)

申 請 者

アブドワイット

ブラット

Plat

Abduvayt

環境資源及び材料理工学

石油工学

2002 年 12 月



管内多相流は石油、化学、原子力、および地熱利用等の広範な産業分野で見られる現象である。石油産業では、油ガスの生産および輸送の過程で多く見られる。石油開発分野における管内多相流技術の重要性はきわめて大きい。特に、開発リスクの大きい遠隔、小規模、または大水深油ガス田では、経済的な開発のための主要な要素の一つである。油ガスを地下から地上生産施設へ、経済的かつ安全に流動させるには管内多相流技術が不可欠である。

多相流を伴うパイプライン設計には、管内の液相（液体ホールドアップ）の分布および圧力損失の高精度な予測が必要である。気液混相流では、管の形状、各相の流体特性と流量、流動条件等によって、流動の内部構造が異なるのが特徴である。このような異なる気液境界の形状を総称して、流動様式（フローパターン）または流動領域（フローレジーム）と呼んでいる。気液二相流の挙動予測のためには、与えられた流動条件下で、どのような流動様式と遷移が生じるかを知る必要がある。

気液二相流に関する主たる研究の方向は、1980年代以降、各流動様式における流動メカニズムを数学モデルによって記述する一般的なメカニスティックモデルの開発に向けられている。メカニスティックモデルは既に実用化の段階にあり、多くの二相流実験データによる評価がなされている。しかしながら、これまでモデルの検証に供されている実験データの多くは直径約 5 cm 以下の小口径管で、実験圧力も約 1000 kPa 以下の低圧条件によるものであり、より大きな口径管による高圧条件下の実験データを用いたモデルの検証と改良が必要とされている。

本研究は、直径 10.64 cm の中口径管による低圧及び高圧条件下の緩傾斜管内気液二相流実験およびモデル化に関する研究であり、次の 6 章から構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の動機付けと研究課題の提示をしている。水平および緩傾斜管内気液二相流で出現する流動様式を、分散気泡流、層状流、間欠流、および環状流に分類し、層状流はさらに平滑層状流、波状層状流、および巻波（roll wave）流に、間欠流は伸長気泡（elongated bubble）流、スラグ流、およびフロス（froth）流に分類している。その上で、各流動様式における流動計算には、まず、与えられた流動条件で発生する流動様式の予測と、流動様式が遷移する流動条件の予測が課題となることを指摘している。

第 2 章では、文献調査および過去の実験データに基づいて、二相流メカニスティックモデル構築の基礎となる流動パラメータおよび圧力損失式を定義し、各流動様式の発生条件と形態を記述している。その上で、各流動様式の流動メカニズムに基づいた流動様式の判別基準または領域間の境界遷移条件、液体ホールドアップ、および圧力損失の計算法に関して、過去の主要な研究内容を纏めて述べている。特に、境界遷移条件に関する主要な提案は、分散気泡流と間欠流間の遷移基準は気泡の合体または分割を起こす力またはエネルギーの関係から、層状流と

非層状流間の遷移基準は気液境界面に働く吸引力と重力の関係から、間欠流と環状流間の遷移基準は環状流における液体フィルムの安定性またはフィルムの層厚から、それぞれ導出されたものであることを指摘している。

第3章では、本研究における実験結果について述べている。実験は新潟県柏崎市にある石油公団テストフィールド内の大型多相流試験施設において、窒素ガスと水を使用し、テスト区間に管内径 10.64 cm、長さ 20 m の管を設置して、その傾斜角度を 0、1、および 3 度として実施された。流動条件は温度  $35 \pm 5$  °C、平均圧力は低圧実験で 592 kPa、高圧で 2060 kPa とし、各傾斜角度で流量を変えて、低圧実験で 35 回、高圧で 81 回の測定を行っている。各回ごとに圧力、温度、流量、および液体ホールドアップを測定している。特に、液体ホールドアップは、プラスチック管に 2 個の環状電極を装着したコンダクタンス型センサーによって測定されている。プラスチック管は、低圧実験では透明なもので内部の流動様式を観察できるが、高圧では耐圧性を確保するために不透明なものである。

実験データの解析により流動様式、液体ホールドアップ、および圧力損失を求めている。分散気泡流では、低圧と高圧実験の間で各相の見掛け速度がそれぞれ同じである場合、流動圧力が液相中に分布する気泡の量に大きく影響することを確認している。層状流では、低圧の小口径管による実験によれば、液相上面は管中心線より低く、また液相見掛け速度 0.08 m/s 以上では発生しないとされているが、本実験では、高圧条件の層状流は管中心線より高い液面を示すものがあり、液相見掛け速度 0.156 m/s でも発生している。層状流は管傾斜角度に最も鋭敏であり、1 度の管傾斜角度でも流動様式は大きな影響を受けることを述べている。間欠流では、まず高圧条件の伸長気泡流に対する管傾斜角度の影響をホールドアップ計の信号により確認している。スラグ流に対する管傾斜角度の影響は、低圧条件では小さいが、高圧では角度の増加によってスラグ間隔が狭くなる傾向を観察している。また、高圧ではスラグ本体内に、より多くの気泡が取り込まれることを示している。フロス流では液体ホールドアップ計の信号はスパイク状になり、管傾斜角度の影響は圧力によらず小さいことを図示している。低圧および高圧条件における各測定点の流動様式の解釈に基づいて、それぞれ傾斜角度ごとに流動様式図を作成している。

液体ホールドアップ計のデータから各測定条件における平均ホールドアップを算定し、流量、圧力、および管傾斜角度の影響を考察している。圧力の影響は、水平管では殆ど見られないが、1 度または 3 度では液相見掛け速度が低い場合に顕著である。また、ホールドアップに対する管傾斜角度の影響は気相および液相の見掛け速度が共に低い場合に顕著に見られる。

圧力損失の測定データについても流量、平均圧力、および管傾斜角度の影響を評価している。特に、傾斜角度が僅かでも増加すると、重力効果により圧力損失は増加し、平均圧力が低いほど大きい圧力損失が生じることを示している。

第4章では、8種の流動様式に対する遷移基準と、各様式における液体ホールドアップおよび圧力損失の計算モデルを組み込んだメカニスティックモデルの構築を行っている。分散気泡流の予測基準は、気相容積率が0.52より小さく、気泡の最大直径が気泡の変形が起きる臨界直径より小さいとしている。次に、層状流と非層状流の遷移判別には、気相平均流速を判別するTaitel-Dakler式および安定的なスラグ流のためのBendiksen-Espedal式を逐次的に適用している。層状流では、まず気相平均流速に関するTaitel-Dakler式によって平滑層状流を判別し、次に気相レイノルズ数に関するLee-Bankoff式によって波状流と巻波流を判別している。非層状流では、まず液相が一定量より大きければ間欠流とし、小さければ環状流と判別している。

液体ホールドアップの予測モデルとしては、分散気泡流ではスリップモデルを適用して液相の質量バランス式から算定している。層状流には、気相および液相見掛け速度によるせん断応力に基づくLockhart-Martinelliの相関式が有効である。間欠流では、スラグ本体および液体フィルムを単位スラグの構成要素として、質量バランス式に各要素の液体ホールドアップを適用している。環状流では、気相コア中の液体エントレインメント率と液膜の厚さ分布の予測から液体ホールドアップを算定している。

第5章では、前章で構築したメカニスティックモデルによる計算精度を評価している。分散気泡流への遷移予測には気泡の変形による基準の適用が、また液体ホールドアップにはスリップモデルによる算定が有効であることを確認している。モデルによる流動様式の予測結果は、3種の管傾斜角度における実験データとよく一致し、その結果、各流動様式における液体ホールドアップおよび圧力損失の算定もよい精度を示している。摩擦係数、分散パラメータ、および流体特性は予測計算に直接影響する。358個の液体ホールドアップデータおよび938個の圧力損失データによってモデルの信頼性評価を行い、それぞれ9.50%および14.38%の絶対平均誤差を得ている。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を纏めて示している。

以上要約すると、本論文は低圧及び高圧条件下における緩傾斜管内気液二相流実験およびモデル化の研究に関するものであり、特に、流動様式、液体ホールドアップ、および圧力損失の計算精度について研究し、それらの成果を取り纏めたものである。

近年の管内混相流技術開発における目標の一つは、一般的なメカニスティックモデルの開発であり、信頼性の高いモデルの構築には特に精度の高い実験データによる検証が必要とされる。本研究では、大型実験ループにおいて低圧および高圧条件下で精度の高いデータを取得し、それに基づいてモデルを構築し、モデルの信頼性を実証しており、気液二相流メカニスティックモデルの実用性を大きく向上させた。