

学 位 論 文 題 名

固体の濡れ性を利用した気液二相流の
相分離に関する研究

学位論文内容の要旨

固体表面の濡れの現象は、固体、気体、液体を同時に扱う場において重要である。一般に“濡れ性が良い”とは、液体が固体表面と大きな界面を形成して広がる場合を言い、“濡れ性が悪い”とは、液体が固体と界面を形成しにくく、むしろ周囲の気体と界面を形成すべく球状になろうとする場合を言う。ここで、濡れ性の程度は周知のように液体が固体となす接触角で評価される。すなわち、接触角が 0° から 90° 未満のとき、濡れ性が良い、 90° から 180° 以下のとき、濡れ性が悪いと定義される。とくに、濡れ性が悪い場合の工業分野への応用例として、固体表面の撥水性を向上させる目的で、テフロン系樹脂皮膜や光触媒反応を利用した酸化チタン皮膜の実用化が、自動車、航空機、建築材料等の業界で急速に発展している。これらはいずれも濡れ性の悪さを固体表面から液体を遠ざけることへ利用したものである。しかしながら、濡れ性の悪さは、固体から液体を遠ざける効果をもつ一方、固体と気体が界面を持ちやすくなる効果を発揮する。すなわち、濡れ性の悪い固体が液体中にある場合、気体は固体へ付着しやすくなる。本研究では、この現象を気液二相流の相分離（気液分離）に応用した。そして、気泡の存在が問題となる、金属精錬プロセス、連続鋳造および熱循環・化学反応プロセス等における、本気液分離法の適用可能性を種々のモデル実験によって評価した。本論文は7章から構成され、それぞれの概略は以下のとおりである。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的を明らかにした。

第2章では、静止液体中に置かれた水平平板に付着できる気泡の形状・寸法を求める簡便な方法を提案し、その妥当性を評価した。静止液体中で固体に付着できる気泡の形状・寸法を求める方法には、ラプラス理論を用い、任意の気液界面における内外の圧力バランスから数値的に求めるラプラス法と、気泡がもつエネルギーの最小理論から求めるポテンシャル法が考えられる。本来、気液二相流における気液分離を検討する以上、液体の流れが存在する。本章では、ラプラス法は、気泡の形状・寸法の予測において、液体の流れによる影響を加味することが困難であることから、ポテンシャル法を採用した。通常、ラプラス法による予測は計算が煩雑であるが、ポテンシャル法による予測においても、正確度を上げるためには複雑な気泡形状モデルを適用する必要がある、その結果、やはり計算が煩雑になる。そこで、簡便な気泡モデルを用いた改良ポテンシャル法を提案し、その性能評価から以下のことを明らかにした。

1) 改良ポテンシャル法は、ラプラス法による計算結果を基準として、実用上重要な接触角

94° から 130° において十分な予測精度を持っている。

- 2) 濡れ性の悪い平板上に付着し、留まることのできる気泡体積は、気泡に働く浮力と表面張力の比を表すボンド数 B を用いて系統的に整理できる。

第3章では、固体の濡れ性を利用した気液分離の一つの例として、気液二相流中に濡れ性の悪い固体（円柱，四角柱，球）を置いた場合の気泡の挙動について調べた。ただし，実験には気液二相流として，水－空気系および水銀－空気系の鉛直気泡噴流を用いた。本章において，以下のことを明らかにした。

- 1) 濡れ性の良い固体への気泡付着は見られないが，濡れ性の悪い固体へは多数の小さな気泡が付着し，気泡を固体表面に集めることが可能である。
- 2) 気体の流量が低く，噴流中の気泡径も小さい場合は，濡れ性の悪い固体に接触した気泡は捕捉され，気泡体積がある臨界値に達するまでは固体上端部近傍に滞留するが，それ以上の体積になると固体から離脱する。また，気体の流量が高く，噴流中の気泡径も大きい場合は，気泡の上昇による激しい乱れのために付着気泡の数，寸法とも減少する。
- 3) 気体の流量が低い場合，離脱直前の気泡寸法が固体の代表寸法より十分小さければ，固体の表面に留まることのできる気泡の体積は，固体の形状・寸法に依存せずほぼ一定であった。また，その体積は，第2章で提案した改良ポテンシャル法を用いてほぼ予測可能である。

第4章から第6章では，固体の濡れ性を利用した気液分離の他の例として，気液二相流が濡れ性の異なる内壁をもつ管路内を流れる場合の気泡の挙動について調べた。用いた管路は円形断面をもつ分岐管であり，いずれも流れの中心軸に関して左右対称な形状を持つ。その中心軸に対して，片側の内面の濡れ性を悪くして気液分離性能を評価した。第4章は鉛直に置いたT字型分岐管，第5章は鉛直に置いたY字型分岐管，そして第6章は水平に置いたY字型分岐管を用いた場合である。いずれも水－空気系気液二相流における相分離を試みた。各章で得られた成果は以下のとおりである。

第4章の鉛直T字型分岐管では，空気の流量が低く，空気が気泡の状態で流れる気泡流領域において分離効率がもっとも高く，約70%の空気を分岐管の濡れ性の悪い側へ流すことが可能であった。しかしながら，空気流量が増加し，気泡の長さが管の内径より大きくなるスラグ流領域においては，気液分離は期待できないことがわかった。さらに，水の流量が高いとき，T字型分岐管は，分岐管の両側の濡れ性に差がない場合でも，空気が左右均等に流れないという不安定な性質をもつことがわかった。

次に，第5章の鉛直Y字型分岐管は，第4章と同様の評価を行った結果，気液の分離効率が鉛直T字型分岐管より優れており，80～90%の空気を分岐管の濡れ性の悪い側へ流すことが可能であった。さらに，鉛直Y字型分岐管は，分岐管の両側の濡れ性に差がない場合，空気および水を左右均等に流す性質を示した。すなわち，流れの対称性を有しており，濡れ性の影響を評価する場合に適していることがわかった。

上記の鉛直に配したTおよびY字型分岐管は，いずれも片側の濡れ性を良くし，片側を悪くすることによって，気液分離が可能であることがわかった。また，流れの可視化により，この分離効果は，気泡が濡れ性の悪い壁へ付着し，濡れ性の悪い側の岐管へ流れ込むことに起因することが明らかになった。

第6章の水平Y字型分岐管を用いた場合の分離効率は，さらに高く，ほぼ100%が可能であった。これは，気泡が浮力により管路の上層部に集中し，濡れ性の悪い側の壁に接触する確率が高くなることに起因する。よって，濡れ性の差をもたせた水平Y字型分岐管は，

地上重力下における気液分離に有効であることが明らかになった。

第7章は結論であり，本研究で得られた知見をまとめ，将来への展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	井口	学
副査	教授	篠原	邦夫
副査	教授	石井	邦宜
副査	教授	荒井	正彦
副査	助教授	木内	弘道

学位論文題名

固体の濡れ性を利用した気液二相流の 相分離に関する研究

近年、溶融還元プロセスや金属精錬プロセスにおける介在物、微細気泡の除去はフォーミング（泡立ち）の抑制だけでなく高品質鋼を生産する上で重要な課題の一つとなっている。溶融金属中の気泡除去に関しては、遠心力、超音波による音圧、マランゴニ対流、静電気力、電磁力などを利用した方法があるが、その気液分離の効率は高いとは言えない。一方、熱工学分野では、冷媒循環システム等で用いられる気液二相流の宇宙での利用に目が向けられている。このようなシステムでは、気液分離が必要な構成要素を有することが多い。無重力下では、気泡に働く浮力による気液分離が期待できないため、新たな分離技術が求められる。その代表的な手法は分岐管を用いた気液分離法と言える。この方法は、流動により生じる気体液体間の慣性力差を利用しており、分岐角度や分岐後の2方向への流量制御により、分離効果が認められているが、十分ではない。

本論文では、濡れ性の悪い固体、すなわち液体を弾く固体へは気泡が付着しやすいという性質に着目し、この性質の気液分離への適用性を以下の2つの状況下で評価している。

- (1) 容器内の液体中に存在する気泡を除去する場合であり、液体中へ濡れ性の悪い固体を浸漬することによって気泡除去を実現する（外部分離）。
- (2) 管内気液二相流中の気泡を管路の一部の濡れ性を変化させることによって分離する（内部分離）。

その結果、(1)の外部分離については、気液二相流中に置いた濡れ性の良い固体への気泡付着は見られないが、濡れ性の悪い固体へは多数の小さな気泡が付着し、気泡を固体表面に捕捉できることを見出した。同時に、工学的に重要となる、捕捉気泡が固体から離脱する際の体積予測に関しては、気泡形状に簡便なモデルを適用した気泡エネルギーの最小化計算による、簡単かつ実用精度を有する予測方法を提案し、その有用性を示した。

(2)の内部分離については、管路をその中心軸を基準に二分割し、片側の内面の濡れ性を悪くした。こうした管路を分岐管へ接続した場合の気液分離性能を、分岐角度および流れの方向を変化させて評価した。すなわち、鉛直上向きの気液二相流に対するT字型およびY字型分岐管、水平の気液二相流に対するY字型分岐管という複合管路において、管路の形状的対称性を保ちつつ、濡れ性の対称性を崩すことにより、大きな気液分離効果を得た。さらに、この分離効果が管内面の濡れ性の違いによる気泡の挙動に起因することを流れの可視化によって明らかにした。

本論文で提案した、固体の濡れ性に基づく気液分離法は、その実用化に向けた最適化検討までは進められていないが、明らかに気液分離効果とその有用性が認められ、気液分離技術の新たな発展の方向付けを示している。

これを要するに、著者は、気液二相流における相分離に対して、濡れ性の悪い固体への気泡の付着現象を利用できるとの新知見を得たものであり、材料プロセス工学における新たな基盤技術の提供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あるものと認める。