

学位論文題名

相変化物質を混合した固液二相流の
熱流体特性に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、エネルギー需要の増大に伴い熱エネルギー有効利用技術への関心が高まり、蓄熱または熱輸送に用いる熱媒体には様々な機能が要求されはじめている。最近では、氷水搬送技術などに代表されるように固体粒子状の相変化物質を液体に混合したスラリー状の流体を用いて潜熱による輸送熱エネルギー密度の高度化を目指す研究が各方面で行われている。しかし、熱流体の高機能化を目的とした材料開発とそのシステム応用研究が盛んである一方、付加した機能が流体现象に与える影響について系統的に実験評価された例は極めて少なく、現象に対する物理的解釈さえ各研究で統一性に欠けるものであった。このため、付加機能が必ずしも十分に発揮されていない状態においてシステム評価が行われるなどの問題も生じている。

本研究は、高機能熱流体として従来から有望視されていた固液相変化物質を内包するマイクロカプセルと液体との混合スラリーを試作して、熱輸送流体としての有効性を実験的に明らかにしたものである。さらに、試作したスラリーを用いてこの種の相変化スラリーにおける流体现象に及ぼす相変化潜熱の影響を検討し、潜熱を利用した熱輸送技術について新たな知見を得ている。マイクロカプセル化された相変化物質は被膜で覆われた微細粒子であるため、相変化物質の凝結・再結晶化がなく、流動性に富み、粒子形状は相変化前後で常に維持される。マイクロカプセル入り相変化物質を混合したスラリーに関する研究例はこれまでも幾つか報告されているが、過去に試作されたマイクロカプセルでは被膜強度が低劣であったこと、さらには相変化を伴う固液二相流の流動・伝熱現象の複雑さなどを主な理由としてスラリー諸特性の中でも流体力学および伝熱工学的なアプローチは甚だ不完全な状態で残されていた。特に、相変化を伴うスラリー乱流について、流れ構造と熱伝達特性との関連性を系統的に検討した実験研究例はこれまでに全くなく、層流に関する既存研究を含めても相変化を伴うスラリーの熱伝達特性に関してはその評価方法でさえ統一されていないのが現状である。本研究では、試作したマイクロカプセルスラリーを用いて相変化を伴うスラリーの熱流体特性を全般的に明らかにしたとともに、この種のスラリーの熱伝達特性に関する適切な評価方法について考察し、供試スラリーが熱輸送流体として有用であることを実験的に検証している。本論文で述べる内容は、マイクロカプセルスラリーの場合に限らず、近い将来において実用化が期待される相変化を伴う固液二相流を用いた潜熱輸送技術一般に共通しており、熱エネルギーの有効活用の観点から工学的に意義ある研究である。

本論文は、結論を含めて全7章から構成されている。その概略は以下の通りである。

第1章は序論であり、熱媒体開発の現状とマイクロカプセルスラリーを用いた過去の研究成果について記すとともに、本論文の目的および構成について述べている。

第2章は、試作したスラリーを構成する材料である相変化物質、カプセル被膜、および懸濁液体の材料特性、およびスラリーの物性値について述べている。また、試作したマイクロカプセルが機械的耐久性および熱的安定性を有することを実験的に検証し、カプセル粒子の小径化によって粒子がスラリー流れ場から受けるせん断応力が緩和されるためにスラリー循環流動時の粒子破壊を回避できることなどを明らかにしている。

第3章では、微細カプセル内の相変化物質の融解・凝固特性、および粒子集合体であるスラリーの相変化応答性について分析評価し、スラリーとしての相変化特性と粒子個々の融解・凝固挙動との間の因果関係について実験的に解明している。相変化物質の微細化に伴い、個々の粒子の融解速度は増大し、その一方で凝固過程での過冷却出現が確認されている。これらの現象がスラリーの相変化過程を含む熱伝導性すなわち相変化応答性に及ぼす影響について検討している。さらに、微細カプセル粒子の過冷却抑制法とその効果について研究し、得られた過冷却のない粒子を用いた実験を通じて、スラリーの相変化応答性に及ぼす微細粒子の過冷却の影響について明確化している。

第4章では、スラリーの流動特性に関して述べている。スラリーの粘性および円管内流動特性について検討し、微細粒子の混合に伴うスラリー粘度の上昇はスラリー乱流を抑制して管内流動時の圧力損失を低減させる効果があることを明らかにしている。また、微細粒子間の凝集性に起因したスラリーの非ニュートンの粘性がスラリーの流動圧力損失の低減に繋がることを実験的に示した。これらとは別に、単相流の場合で報告される界面活性剤系の乱流抑制剤を添加した場合の流動抵抗低減現象について、マイクロカプセルスラリーでの発現可能性を検討し、液体中に生成される界面活性剤ミセルの形成に及ぼすスラリー乱流中での粒子運動と影響について明らかにしている。

第5章では、スラリーの強制対流熱伝達特性について述べている。加熱円管流路内のスラリー混合平均温度を実測し、スラリー層流から乱流に亘る相変化時の局所熱伝達係数を評価した。スラリー乱流では相変化時に局所熱伝達係数が増大し、その増大量はスラリー中の相変化物質濃度、流れの乱れ程度および加熱された管壁からの熱入力に依存することを実験的に明らかにすると共に、これらのパラメーターと局所熱伝達係数の関係について、乱流混合モデルを設定した上で実験値に基づいた感度解析を行い、最適なスラリー熱交換条件を得ている。さらに、相変化を伴うスラリーの熱伝達特性評価における従来法の問題点について幾つか指摘している。

第6章では、試作したスラリーを用いた熱輸送システムのエネルギー効率について実験結果に基づいた試算検討を行っている。この結果、単相流体である水を用いた場合よりも熱輸送効率が向上することが示されている。また、蓄熱ユニットを併設した熱源プラントを想定して経済効果の試算を行い、水、氷水およびマイクロカプセルスラリーを媒体とした各プラント相互の比較を行った結果、媒体費用すなわちマイクロカプセルの製造コストを考慮しない場合では蓄熱密度の増大をはじめとするスラリー機能が総合的に発揮されることによって経済性が向上することを示している。

第7章は結論であり、本研究で得られた主要な結果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 粥 川 尚 之
副 査 教 授 熊 田 俊 明
副 査 教 授 千 葉 忠 俊
副 査 教 授 福 迫 尚 一 郎

学 位 論 文 題 名

相変化物質を混合した固液二相流の 熱流体特性に関する研究

近年、熱エネルギー有効利用技術の一つとして、熱輸送媒体を固体粒子状の相変化物質を混合したスラリーとし、潜熱による輸送熱エネルギーの高密度化を目指す研究が各方面で行われている。しかし、高機能化を目的とした熱流体の開発とその熱輸送システムへの応用研究が盛んである一方で、付加した機能が流体特性に及ぼす影響や物理現象に関する系統的かつ定量的実験は必ずしも十分でなく、これらに関して説明されていない現象も少なくない。マイクロカプセル混合スラリーの研究例はこれまでも幾つか報告されているが、過去に試作されたマイクロカプセルでは被膜強度が低劣であったこと、さらには相変化を伴う固液二相流の流動・伝熱現象の複雑さを主な理由として流体力学および伝熱工学的なアプローチは甚だ不完全な状態で残されていた。特に、相変化を伴うスラリーの乱流々動について、相変化と熱伝達特性との関連を系統的に明らかにした実験例はこれまでになく、熱伝達特性の評価方法でさえ統一されていない現状である。

本研究では、高機能熱流体として従来から有望視されていた固液相変化物質を内包するマイクロカプセルと液体との混合スラリーを試作して、機能性熱輸送流体としての有効性を実験的に明らかにしている。マイクロカプセル化された相変化物質は被膜で覆われた微細粒子であるため、氷・水スラリーに見られるような相変化物質の凝結・再結晶化がなく、流動性に富み、粒子形状は相変化前後で常に維持される。この性質に基づいて著者は、まず適切な相変化物質の選択、ミクロン級マイクロカプセルの試作、試作スラリーを用いたマイクロカプセルの耐久性の検証、粘性等の流体物性値の測定、ニュートン流体化の方法と検証、過冷却の影響とその対策の具体的提案、層流から乱流に及ぶ広い流れにおける流動抵抗損と相変化を伴う伝熱特性に関する系統的实验を行い、この種のスラリーの熱伝達特性に関する適切な評価方法の考察、さらには実験データに基づき熱輸送システムに応用した場合の効果を試算してマイクロカプセル化相変化物質混合スラリーが熱輸送媒体として有用であることを検証している。

以上、本研究で得られた知見の多くは、マイクロカプセルスラリーに限らず、今後実用化が期待される相変化を利用する固液二相流による潜熱輸送技術一般に有用であり、エネルギー工学、伝熱工学の進歩に寄与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。