

氏 名	はら だ えい じ 原 田 英 二
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 10 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 47 年 3 月 山形大学工業短期大学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	管内固液混相流の伝熱に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 太田 照和 東北大学教授 武山 斌郎 東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 斎藤正三郎

論 文 内 容 要 旨

液体中に固体粒子を分散した流れである所謂固液混相流は、古くから固体の輸送手段として各種工業で利用されてきた。そのため従来の工学的研究においては、輸送装置の最適設計法および最適運転法の確立を目的として、管路の圧力損失や粒子分散状態などの流動問題に関しては数多くの研究が成され、これまでにかかなりの成果が得られ実用に供されている。

しかしながら最近の工業技術の多様化に伴い、単純な輸送を目的とした応用のみならず伝熱操作を伴う形式での応用も成されつつある。すなわち、単相流に意図的に固体粒子を添加することにより壁面での伝熱速度を向上させる所謂伝熱促進法としての応用、あるいは水処理技術における液相吸着法やイオン交換操作、固定化酵素を用いた反応操作など種々の固液接触操作での応用等が挙げられるが、これらの場合には流体力学的知見のみならず輸送管と混相流との間の伝熱速度や管内温度分布等の伝熱工学的知見が必要不可欠である。しかるに固液混相流の伝熱研究は国内外ともに未だ数少なく、また散見される研究の大部分が単相非ニュートン流体と近似し得る微粒子懸濁液に関するものであり、粗粒子を取り扱うことの多い上述の工業的応用に対して指針を与えるまでには至っていない。

そこで本研究では、比較的大きな粒子を含む固液混相流体の管内流れを対象として伝熱機構を解明し、その成果に基づいて伝熱促進法としての指針ならびに伝熱を伴う固液混相流操作に関する指針を明確にすることを目的とした。

第 1 章 緒 論

本章では粗粒子を含む固液混相流を単に固体の輸送手段としてのみならず伝熱促進あるいは触媒粒子や固体反応物を利用する化学反応操作等に応用する際には、混相流の流体力学的知見のみならず伝熱特性を十分に把握する必要性を述べた。次いで固液混相流の粒子分散状態、圧力損失および伝熱に関する既往の研究を概説したのちに、本論文の概要を説明した。

第 2 章 垂直固液混相流の熱伝達実験

本章では垂直円管内における上昇および下降固液混相流の伝熱実験結果を論じた。すなわち、平均流速、粒子径、粒子密度および粒子濃度等の操作条件と混相流—管壁間の熱伝達係数との関係を実験的に明らかにし、また管内温度分布および管内粒子濃度分布の測定も行い、それら諸量の相互関係を考察した。

その結果上昇混相流においては低流速域において大きな伝熱促進効果が得られること、また高流速域においても若干の効果が得られることが分かった。しかるに中流速域においては、粒子を添加することが逆に伝熱を抑制する場合もあることが判明し、操作条件の選定には注意を要することを指摘した。一方、下降混相流の熱伝達係数は单相流の値より大きく低下することはなく、粒子添加による伝熱促進効果は低流速で粒子濃度が大きく、粒子径の大きな場合ほど大きいことが分かった。以上の測定結果に基づいて、上昇流および下降流の各々について、熱伝達係数の実験式を提示した。

次いで管内粒子濃度分布および管内平均濃度と吐出濃度との関係を実験的に求め、熱伝達係数との関連を考察した。その結果、粒子が管断面に比較的均一に分布しているか、あるいは管壁近くに多く集まっている状態の時に伝熱の促進効果が得られ、管軸付近に粒子が集まっている条件下では逆に抑制効果が表れることが分かった。したがって、この促進効果と抑制効果を適切に利用することにより、作動流体の伝熱操作を最適に行う粒子濃度分布と操作条件の関係を表示した。

第 3 章 圧力損失との相似則を利用した混相流熱伝達の解析

本章では单相流の乱流熱伝達について Martinelli の提案した圧力損失と熱伝達の相似則を混相流に拡張し前章に示した垂直混相流の乱流熱伝達を解析した。

先ず上昇流と下降流の圧力損失を測定し、各々について実験式を与えた。次いで、粒子が比較的均一に分散している高流速域での速度分布を測定し、Spalding の单相流についての関数形を利用して管壁から管中心にいたる全領域の速度分布を一つの式で表示し、速度分布の予測を可能とした。

以上の結果を用いて上昇流の高流速域における熱伝達係数と温度分布を相似側によって推算し、前章で得られた実測値と良好に一致することを示した。また下降流の熱伝達係数に関しても同様の一致を確認した。さらに、混相流の熱伝達係数が单相流の値よりも小さくなる中流速の上昇流に関しても速度分布から計算された熱伝達係数は実測値と良好に一致し、粒子の添加が伝熱を抑制する現象も本相似則によって説明し得ることを認めた。この結果より、発達した乱流の固液混相流熱伝達は速度分布という巨視的な流動状態に支配されているとの結論を得た。

第4章 水平固液混相流の熱伝達実験

本章では水平円管流路における固液混相流の熱伝達について実験的検討を加えた。

水平流においては、流速の低下につれて(1)全粒子が浮遊分散しつつ移動する流れ(浮遊流)、(2)粒子の一部が管底を擦りながら移動する流れ(摺動流)および(3)管底に粒子堆積層を形成する流れ(固定層形成流)と流動様式が変化し、この変化に伴って熱伝達係数も変化することを認めた。すなわち、不均一浮遊流では、粒子径や粒子濃度によらず熱伝達係数は常に单相流の値よりも10~20%大きく、摺動流から固定層形成流にかけては一旦单相流の値とほぼ等しいか、あるいは若干小さな値をとり、固定層形成流では单相流の値よりも大きくなることが分かった。そのような状況を踏まえ、不均一浮遊流の熱伝達係数について実験式を提案し、また流速分布と温度分布の測定から、摺動流ならびに固定層形成流における伝熱機構を検討した。その結果、摺動流と固定層形成流の伝熱機構が類似していること、また固定層形成流では管壁から流入する熱の大部分が固定層上部空間の混相流によって移動するものの、固定層内にも微弱な流れが存在し、この流れが管底から混相流への伝熱速度を増大させていること等が分かった。

第5章 水平固液混相流の伝熱機構に関する検討

本章では上下二面を伝熱壁とした水平矩形流路を用いて混相流の伝熱実験を行い、主として固定層形成流の伝熱機構を考察した。更にそれに基づいて熱伝達係数の簡便な推算法を提案した。

水平矩形流路による実験結果から、固定層上部空間の混相流は不均一浮遊流の形態をとること、また小さな粒子から成る固定層内の温度分布は直線的で、内部の熱移動は静止流体中の粒子充填層の熱伝導と見なせること、一方大きな粒子から成る固定層内の温度分布は曲線となり、粒子層内の微弱な流れの影響が無視し得ないこと等の知見を得た。これらの知見に基づいて、熱伝達係数を推算する簡単な伝熱モデルを提案した。本モデルは、固定層内の伝熱を、流れを伴う粒子充填層内の伝熱として有効熱伝導率で評価するものである。本モデルによる熱伝達係数の計算値は実測値と良好に一致した。また摺動流に対しても、これを極く薄い固定層を伴った流れとみなすことにより、本モデルが適用できることを示した。

以上の成果を踏まえて、矩形流路内混相流の伝熱モデルを円管流路内混相流へ拡張した。この拡張した伝熱モデルによって固定層形成流と摺動流の熱伝達係数が十分な精度で推算できた。不均一浮遊流の熱伝達係数に対する前章の実験式をあわせ用いることにより、高流速域から低流速域までの広範囲にわたる熱伝達係数の挙動を表し得た。

第6章 総括

本研究で得られた成果を総括的に述べた。

以上の研究成果は、従来の固液混相流の伝熱に関する研究においては公表されておらず、粗粒子を含む固液混相流の伝熱特性について低流速域から高流速域までの広範囲にわたる平均熱伝達係数のみならず温度分布等多くの新しい知見をもたらした。これより、伝熱促進法としての操作指針のみならず伝熱を伴う固液混相流操作に関する指針が明らかとなり、本研究の目的を十分に達成し得たものと考えられる。

審 査 結 果 の 要 旨

固体の輸送手段としての固液混相流が、近年の工業の多様化・高度化に伴い、熱あるいは物質の移動を伴うプロセスにも幅広く利用されてきている。しかしながら、流れはきわめて複雑であり、固液混相流の伝熱に関する研究は数少ない。散見される研究も単相流非ニュートン流体で近似できる微粒子懸濁液に関するもので、粗粒子までを含む研究はほとんどなされていないのが現状である。

著者はこの点に着目し、比較的大きな粒子までも含む固液混相流体の管内流れを取り上げて伝熱機構を解明し、それに基づいて伝熱促進法としての指針ならびに伝熱を伴う固液混相流操作に関する指針を明確にした。本論文はそれらの成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、垂直円管内における上昇および下降固液混相流の伝熱特性を実験的に検討し、平均流速、粒子径、粒子密度および粒子濃度等の操作条件と熱伝達係数との関連を明確にし、粒子の添加が伝熱を促進する場合と抑制する場合のあること、それと粒子分散状態との関連を示すなど重要な知見を得ている。

第3章では、単相流の乱流熱伝達について提唱されている圧力損失と熱伝達の相似則を混相流に拡張して垂直混相流の乱流熱伝達を解析し、前章に示した実験値と良く一致することを見出し、解析の妥当性を確認している。これは有用な成果である。

第4章では、水平円管流路における固液混相流の伝熱特性を実験的に検討している。流速の低下とともに、浮遊流、摺動流、固定層形成流へと変化するが、それらと熱伝達係数との関連を明らかにし、伝熱機構を論じている。

第5章では、水平矩形流路における伝熱実験を行い、とくに、固定層形成流の伝熱機構を解明している。それに基づいた伝熱モデルを提案し、実験値と良く一致すること、また、摺動流へも適用できることを確認している。さらに、円管内固液混相流へ拡張することを試み、本伝熱モデルが十分な妥当性を有することを示している。

第6章は総括である。

以上要するに本論文は、管内の固液混相流の伝熱特性を広範囲にわたり明らかにし、さらに、実用面への応用に有用な指針を提示したもので、伝熱工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。