

学位論文題名

振動する物体に働く流体抗力および熱・物質移動

学位論文内容の要旨

化学工業のプロセスでは、固-液系、固-気系などの粒子分散系を扱う操作が多い。工業装置条件では、これらの系における流体の流れの状態は乱流であることが多く、装置設計には、運動する物体に働く流体抗力、物体と流体の間の熱・物質移動速度などに関する知見が不可欠である。移動現象に関するこれまでの基礎的研究では、定常流については多くの理論的、実験的知見が蓄積されている。これに対し、熱・物質移動速度の促進や、粒子の分級性能の向上に対して効果が期待できる振動流の応用については、これまで二、三の試みがなされているが、移動速度と操作条件の関係を明らかにするような基礎的研究は少なく、とりわけ実用的にも重要な乱流域を対象としたものは極めて少ない。

物体と流体がともに加速運動をするときの球形粒子に働く流体抗力を解析的に推定することは層流域では可能であるが、乱流域では極めて難しく、適当な仮定に基づいて近似的に記述せざるを得ない。例えば、物体に働く力が物体と流体の相対速度に起因する速度抵抗と、相対加速度に起因する加速度抵抗の線形和により表され、それぞれの係数である抵抗係数と付加質量係数が流れの状態に依存して変化すると仮定すると、各係数を流体力学的パラメータの関数として表すことができれば、この場合の抗力を計算することができる。しかしながら、既往の研究では速度抵抗の評価に定常状態における抵抗係数を用いており、これに基づいて非定常加速運動の場合の流体抗力を計算すると、実験値と著しく異なることが多い。一方、静止流体中で加速運動する物体と流体間の熱・物質移動速度は、定常運動の場合におけるそれと大きく異なることがいくつかの実験的研究により明らかにされているが、実用的に重要である定常流中で物体が加速運動する場合の移動速度を決定した研究はほとんどない。

以上の背景から、本研究は非定常性が顕著に現れる振動する物体からの移動現象を対象として、静止流体ならびに定常流中で物体が乱流域において加速運動することによる流体抗力と熱・物質移動の変化を評価し、その特徴を明かにしたものである。本論文は以下の5章から成る。

第1章は緒言であり、本研究の背景、問題点および本論文の構成を述べている。

第2章では、静止流体あるいは定常流中で正弦振動する物体に働く流体抗力を測定し、乱流域における操作変数と抵抗係数および付加質量係数との関係を検討した。まず、抵抗係数と操作変数の関係を、物体が流体に対して行う仕事率を介して相関することを試みた。すなわち、定常流中で振動する球、円柱あるいは円板が流体に対し

て行う仕事率の一周期振動内での平均値 (E_{fv}) を求め、静止流体中で振動する物体の平均仕事率 (E_v) および定常流中に静置した物体が行う仕事率 (E_f) との関係を検討した結果、これらの関係が物体形状には関わりなく、 E_{fv} の $2/3$ 乗は E_v の $2/3$ 乗と E_f の $2/3$ 乗の和によって十分な精度で表し得ることを初めて見出した。つぎに、振動する物体に働く流体抗力が速度抵抗と加速度抵抗の線形和により表されると仮定し、Keuleganらのフーリエ変換法を用いて一周期平均の抵抗係数と付加質量係数として流体抗力を評価し、これらの係数と修正レイノルズ数、無次元振幅比との関係を検討した。その結果、まず、静止流体中で修正レイノルズ数が 2000 以上の領域では、いずれの係数も無次元振幅のみの関数として記述できることを見出した。しかし、定常抵抗係数と完全流体についての付加質量係数を用いて計算した流体抗力は実測値とは一致せず、無次元振幅が大きいくほど両者の差は増大した。つぎに、上記仕事率に関する実験式に基づいて定常流中の抵抗係数を定常流速基準のレイノルズ数、無次元振動速度、無次元振幅の3つの流動パラメータにより表した新たな関係式を導いた。

第3章では、正弦振動する流体中を沈降する粒子の時間平均沈降速度を測定し、これを流体の操作変数から評価する方法を示した。まず、径と密度が異なる三種類の粒子の沈降速度が本実験範囲内では流体の振動数と振幅の増加とともに遅くなり、静止流体中での沈降速度と比較して最大で 25%遅くなることを明らかにした。ついで、実測した沈降速度と運動方程式から抵抗係数を算出し、前章の結果をもとに、この抵抗係数を流体の操作変数（振動振幅、振動数）と静止場での抵抗係数から推算する実験式を提出した。この実験式から得た抵抗係数を用いて計算した時間平均沈降速度は、実測値と±5%以内で良く一致し、前章までに明らかにした新たな知見が、分級精度の向上を目的とする脈動流中での沈降速度の推算に役立つことを示した。これに対し、瞬時定常状態を仮定し、定常状態抵抗係数と完全流体付加質量係数を用いて沈降速度を計算した場合には、振動による沈降の遅延を極めて過小評価し、20% 以上の違いが生ずることを明らかにした。

第4章においては、静止流体中および定常流中で振動する物体からの熱・物質移動速度を測定し、操作変数との関係を検討した。すなわち、最大速度基準のレイノルズ数が約 1000 から 10000の範囲において静止流体中で振動する球、円柱および円板からの無次元化移動速度が、このレイノルズ数の関数として表されることを示した。また、移動促進の視点から、振動による移動速度の増加を流体抗力から求めた時間平均仕事率により評価した。その結果、流体と物体の相対速度を時間的に変化させることは、定常流速を大きくすることよりも効率的であること、定常流による移動速度に対する振動の影響を時間平均仕事率により整理すると、物体形状にほぼよらない同一の相関式で表すことができ、移動速度は時間平均仕事率の $1/6$ 乗に比例するという新たな知見を得た。さらに、振動する物体が流体に対して行う仕事と物質移動速度の相関式をもとに、物質移動速度の評価に有効な促進因子を提案し、この因子により定常流中で振動する球、円柱および円板からの物質移動速度は定常流に関する既往の実験式を含む一般的な相関式によって高い精度で表し得ることを明らかにした。

第5章は、本研究の結論であり、研究成果を総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 竹 澤 暢 恒
副 査 教 授 篠 原 邦 夫
副 査 教 授 千 葉 忠 俊
副 査 教 授 福 迫 尚 一 郎

学 位 論 文 題 名

振動する物体に働く流体抗力および熱・物質移動

化学工業のプロセスでは、固-液系、固-気系などの粒子分散系を扱う操作が多い。工業装置条件では、これらの系における流体の流れの状態は乱流であることが多く、装置設計には、運動する物体に働く流体抗力、物体と流体の間の熱・物質移動速度などに関する知見が不可欠である。移動現象に関するこれまでの基礎的研究では、定常流については多くの理論的、実験的知見が蓄積されている。これに対し、熱・物質移動速度の促進や、粒子の分級性能の向上に対して効果が期待できる振動流の応用については、これまで二、三の試みがなされているが、移動速度と操作条件の関係を明らかにするような基礎的研究は少なく、とりわけ実用的にも重要な乱流域を対象としたものはきわめて少ない。

物体と流体がともに加速運動をするときの球形粒子に働く流体抗力を解析的に推定することは層流域では可能であるが、乱流域では極めて難しく、適当な仮定に基づいて近似的に記述せざるを得ない。例えば、物体に働く力が物体と流体の相対速度に起因する速度抵抗と、相対加速度に起因する加速度抵抗の線形和により表され、それぞれの係数である抵抗係数と付加質量係数が流れの状態に依存して変化すると仮定すると、各係数を流体力学的パラメータの関数として表すことができれば、この場合の抗力を計算することができる。しかしながら、既往の研究では速度抵抗の評価に定常状態における抵抗係数を用いており、これに基づいて非定常加速度運動の場合の流体抗力を計算すると、実験値と著しく異なることが多い。一方、静止流体中で加速度運動する物体と流体間の熱・物質移動速度は、定常運動の場合におけるそれと大きく異なることがいくつかの実験的研究により明らかにされているが、実用的に重要である定常流中で物体が加速度運動する場合の移動速度を決定した研究はほとんどない。

以上の背景から、本研究は非定常性が顕著に現れる振動する物体からの移動現象を対象として、静止流体ならびに定常流中で物体が乱流域において加速度運動することによる流体抗力と熱・物質移動の変化を評価し、その特徴を明かにしたものである。本論文は以下の5章から成る。

第1章は緒言であり、本研究の背景、問題点および本論文の構成を述べている。

第2章では、静止流体あるいは定常流中で正弦振動する物体に働く流体抗力を測定し、乱流域における操作変数と抵抗係数および付加質量係数との関係を検討した。とくに定常流中については、抵抗係数と操作変数の関係を、物体が流体に対して行う仕事率を介して相関することを試みた。まず、定常流中で振動する球、円柱あるいは円板が流体に対して行う仕事率の一周期振動内での平均値 ($E_{r,v}$) を求め、静止流体中で振動する物体の平均仕事率 (E_v) および定常流中に静置した物体が行う仕事率 (E_r) との関係を検討した結果、これらの関係

が物体形状には関わりなく、 $E_{z,v}$ の $2/3$ 乗は E_v の $2/3$ 乗と E_z の $2/3$ 乗の和によって、十分な精度で表し得ることを初めて見出した。ついで、振動する物体に働く流体抗力が速度抵抗と加速度抵抗の線形和により表されると仮定し、Keuleganらのフーリエ変換法を用いて一周期平均の抵抗係数と付加質量係数として流体抗力を評価し、これらの係数と修正レイノルズ数、無次元振幅比との関係を検討した。その結果、静止流体中で修正レイノルズ数が2000以上の領域では、いずれの係数も無次元振幅のみの関数として記述できることを見出した。一方、定常抵抗係数と完全流体についての付加質量係数を用いて計算した流体抗力は実測値とは一致せず、無次元振幅が大きいほど両者の差は増大した。つぎに、定常流中の抵抗係数については、上記仕事率に関する実験式に基づいて定常流速度基準のレイノルズ数、無次元振動速度、無次元振幅の3つの流動パラメータにより表される新たな関係式を導いた。

第3章では、正弦振動する流体中を沈降する粒子の時間平均沈降速度を測定し、これを流体の操作変数から評価する方法を示した。まず、径と密度が異なる三種類の粒子の沈降速度が本実験範囲内では流体の振動数と振幅の増加とともに遅くなり、静止流体中での沈降速度と比較して最大で25%遅くなることを明らかにした。ついで、実測した沈降速度と運動方程式から抵抗係数を算出し、前章の結果をもとに、この抵抗係数を流体の操作変数（振動振幅、振動数）と静止場での抵抗係数から推算する実験式を提出した。この実験式から得た抵抗係数を用いて計算した時間平均沈降速度は実測値と±5%以内で良く一致し、前章までに明らかにした新たな知見が、分級精度の向上を目的とする脈動流中での沈降速度の推算に役立つことを示した。これに対し、瞬時定常状態を仮定し、定常状態抵抗係数と完全流体付加質量係数を用いて沈降速度を計算した場合には、振動による沈降の遅延を極めて過小評価し、20%以上の違いが生ずることを明らかにした。

第4章においては、静止流体中および定常流中で振動する物体からの熱・物質移動速度を測定し、操作変数との関係を検討した。すなわち、最大速度基準のレイノルズ数が約1000から10000の範囲において静止流体中で振動する球、円柱および円板からの無次元化移動速度が、このレイノルズ数の関数として表されることを示した。また、振動による移動速度の増加を、第2章で明らかにした流体抗力から求めた時間平均仕事率により評価した。その結果、流体と物体の相対速度を時間的に変化させることは、定常流速度を大きくすることよりも効率的であること、定常流による移動速度に対する振動の影響を時間平均仕事率により整理すると、物体形状にほぼよらない同一の相関式で表すことができ、移動速度は時間平均仕事率の $1/6$ 乗に比例するという新たな知見を得た。さらに、振動する物体が流体に対して行う仕事と物質移動速度の相関式をもとに、物質移動速度の評価に有効な促進因子を提案し、この因子により定常流中で振動する球、円柱および円板からの物質移動速度は定常流に関する既往の実験式を含む一般的な相関式によって高い精度で表し得ることを明らかにした。

第5章は、本研究の結論であり、研究成果を総括している。

これを要するに、著者は、一連の基礎実験より、定常流および静止流体中で振動する物体の一周期平均仕事率と定常流中に静置された物体が行なう平均仕事率との間にきわめて簡便、有用な実験的相関を見だし、これを基本的知見として、振動による非定常移動現象を工学的に評価したものであり、化学工学の進歩に対して貢献するところ大なるものである。

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。