

# 光によるエマルションスラリーの 固化率計測手法に関する研究

## 学位論文内容の要旨

エネルギーの有効利用の上で、廃熱の回収、利用は欠かせないものである。一般に廃熱発生源とその利用先には時間、空間的なずれが付きまとうため、蓄熱と熱輸送という二つの技術によって、このずれを吸収しなければならない。このような背景を踏まえ、物体の相変化を利用した潜熱蓄熱材の開発が行われてきた。中でも、パラフィンを界面活性剤によって水中に球形粒子群で分散させたエマルションスラリーは、パラフィンの種類により蓄熱温度が選定可能であり、顕熱蓄熱材に比べ蓄熱密度が高く、固体状態で配管輸送できるという特長をもつ。このため温度域に合わせた蓄熱材選定により、水を用いた顕熱蓄熱システムに比べ、ポンプ動力、蓄熱槽容量の低減が可能である。このエマルションスラリーを用いた蓄熱システムは、すでに実機適用が開始されているが、実機の運転調整や点検の上で、潜熱放出、吸収量に直結するパラフィン粒子の固化率を計測評価する技術は欠かせないものである。現在は、示差走査熱量測定などサンプリングと分析を必要とする時間と手間のかかる手法に頼らざるを得ない。しかし、近年エマルションスラリーの光学特性と固化率間の相関が確認され、これを応用した非接触による逐次固化率計測手法が確立されれば、評価は非常に容易、かつ利便なものとなる。ところが現在、この相関が生じる原因は明らかにされていない。よって、光を用いたエマルションスラリーの固化率計測手法の確立を見据え、本研究では、パラフィン粒子群でのふく射輸送解析によりこの現象を解明することを目的としている。

第1章では、緒言として本研究の背景、目的ならびに研究概要が述べられている。

第2章では、粒子群や非球形粒子に対するふく射輸送に関連する従来の研究について述べられている。充填層を代表とする球形粒子群、繊維層断熱材をモデル化した円筒形粒子群については様々な研究が行われ、その媒体のふく射輸送特性が明らかになりつつある。一方、主に気象学や光学の分野において、すでに粒子凝集体、六角柱など非球形粒子の散乱特性が調査されている。しかし、後述する固化したパラフィン粒子のような特殊形状粒子に適用可能な研究例は無く、新規に開発が必要であることが述べられている。

第3章では、エマルションスラリーを対象とした反射・透過実験の方法と結果について述べられている。これは、透明ガラスヒータに挟まれたエマルションスラリーに光を照射しつつその温度を変化させ、パラフィン粒子の固化率とその反射光、透過光画像を記録し、輝度を数値化して評価するものである。この実験から、固化率の上昇により、透過光の輝度は低下し、反射光の輝度は上昇する結果が得られている。完全固化時の透過光輝度は完全液化時の約40%、完全液化時の反射光輝度は、完全固化時の約75%である。また、顕微鏡観察により、球形であった液体粒子は、固化によってその表面に波長に比べ大きくばみを有するという特殊形状に変化することが示されている。

第4章では、パラフィン粒子群に対するふく射輸送解析手法が説明されている。開発された手法は、幾何光学、ならびに独立散乱の仮定を導入したモンテカルロ法によるものである。現象としては粒子と水、ならびに水とガラスの界面における光の反射・屈折が考慮されている。手法の特徴は、上述の固化したパラフィン粒子を模擬したくぼみを有する粒子でのエネルギー粒子追跡にある。このくぼみは円錐形状でモデル化され、乱数を用いて粒子表面にあるくぼみの位置が任意に定められる。エネルギー粒子追跡の際は、これとくぼみとの干渉の有無を判断しつつ座標変換を交えて、幾何学的に解析される。

第5章では、開発した手法の検証がなされている。モデル検証のため、他者の球形粒子群に対する透過解析、ならびに透過実験結果との比較がなされている。これにより、本モデルでは粒子の透明、不透明にかかわらず、球形粒子群のふく射透過特性が予測可能であること、独立散乱が成立する領域、つまり粒子体積分率がおよそ0.3以下の範囲において適用できることが示されている。また、本研究に用いたエマルションスラリー中の粒子体積分率0.14であり、この制限が問題とならないことが述べられている。

第6章では、第3章で示した透過光、ならびに反射光強度の計測試験を模擬した解析が行われている。この結果、固化したパラフィン粒子のくぼみを無視した場合、固化率の上昇による透過光強度、ならびに反射光強度の変化が実験値よりも小さくなることが示されている。一方、くぼみを考慮したモデルでは、これらが実験値とよく一致することが示されている。また散乱位相関数の評価により、くぼみを有するパラフィン粒子においては側方、後方へのふく射の散乱割合が増加することが示されている。円錐くぼみの軸の天頂角をパラメータとした解析から得られた散乱位相関数より、この原因として、エネルギー粒子の入射側にくぼみが存在する場合、これにエネルギー粒子が衝突することによって、くぼみ界面での反射による散乱割合が増加すること、またエネルギー粒子の屈折側にくぼみが存在する場合、これにエネルギー粒子が衝突することによって、パラフィン粒子内での多重反射の割合が増加すること、の二点が挙げられている。

第7章では、本研究で得られた結論が述べられている。

以上より、パラフィン粒子の固化率上昇に伴う、エマルションスラリーの光学特性の変化は、固化した粒子表面に生じるくぼみにより引き起こされたものと結論付けられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐々木 克 彦

副 査 教 授 大 島 伸 行

副 査 教 授 近 久 武 美

副 査 教 授 工 藤 一 彦 (芝浦工業大学)

## 学 位 論 文 題 名

### 光によるエマルションスラリーの 固化率計測手法に関する研究

エネルギーの有効利用の上で、廃熱の回収、利用は欠かせないものである。一般に廃熱発生源とその利用先には時間、空間的なずれが付きまとうため、蓄熱と熱輸送という二つの技術によって、このずれを吸収しなければならない。このような背景を踏まえ、物体の相変化を利用した潜熱蓄熱材の開発が行われてきた。中でもパラフィン界面活性剤によって水中に球形粒子群で分散させたエマルションスラリーは、パラフィンの種類により蓄熱温度が選定可能であり、顕熱蓄熱材に比べ蓄熱密度が高く、固体状態で配管輸送できるという特長をもつ。このため温度域に合わせた蓄熱材選定により、水を用いた顕熱蓄熱システムに比べ、ポンプ動力、蓄熱槽容量の低減が可能である。このエマルションスラリーを用いた蓄熱システムは、すでに実機適用が開始されているが、実機の運転調整や点検の上で、潜熱放出、吸収量に直結するパラフィン粒子の固化率を計測評価する技術は欠かせないものである。現在は、示差走査熱量測定などサンプリングと分析を必要とする時間と手間のかかる手法に頼らざるを得ない。しかし、最近になりエマルションスラリーの光学特性と固化率間の相関が確認されたことから、これを応用した非接触による逐次固化率計測手法が確立されれば、評価は非常に容易、かつ利便なものとなる。ところが現在、この相関が生じる原因は明らかにされていない。本研究は、光を用いたエマルションスラリーの固化率計測手法の確立を見据え、パラフィン粒子群でのふく射輸送解析によりこの現象を解明することを目的としている。

まず、粒子群や非球形粒子に対するふく射輸送に関連する従来の研究について述べ、充填層を代表とする球形粒子群、繊維層断熱材をモデル化した円筒形粒子群についてのふく射輸送特性や非球形粒子の散乱特性に関する研究の現状から、本研究で行う特殊形状粒子である固化したパラフィン粒子に関する研究の重要性を明確にしている。

エマルションスラリーを対象とした反射・透過の実験として、透明ガラスヒータに挟まれたエマルションスラリーに光を照射しつつその温度を変化させ、パラフィン粒子の固化率とその反射光、透過光画像を記録し輝度を数値化して評価する手法を新たに開発した。この実験から、固化率の上昇により、透過光の輝度は低下し、反射光の輝度は上昇する結果を得るとともに、顕微鏡観察により、球形であった液体粒子は、固化によってその表面に波長に比べ大きくぼみを有するという特殊形状に変化することを示した。

ついで、実験結果を再現するためのパラフィン粒子群に対するふく射輸送解析手法を幾何光学、ならびに独立散乱の仮定を導入したモンテカルロ法を用いて開発し、固化したパラフィン粒子を模擬したくぼみを有する粒子に対するエネルギー粒子を追跡した。これにより、従来行われている球形粒子群に対する透過解析や透過実験結果との比較から、本手法では粒子の透明、不透明にかかわらず、球形粒子群のふく射透過特性が予測可能であること、独立散乱が成立する領域においても本手法を適用可能であることを示した。

また、透過光や反射光強度の計測試験を模擬した解析を行い、固化したパラフィン粒子のくぼみを無視した場合には、固化率の上昇による透過光強度と反射光強度の変化が実験値よりも小さくなること、一方、くぼみを考慮したモデルでは、これらが実験値とよく一致すること、さらに、散乱位相関数の評価により、くぼみを有するパラフィン粒子においては側方、後方へのふく射の散乱割合が増加することを示した。これらの原因を明確にするために、円錐くぼみの軸の天頂角をパラメータとした解析による散乱位相関数を導入し、エネルギー粒子の入射側にくぼみが存在する場合、これにエネルギー粒子が衝突すると、くぼみ界面での反射による散乱割合が増加すること、またエネルギー粒子の屈折側にくぼみが存在する場合、これにエネルギー粒子が衝突することによって、パラフィン粒子内の多重反射の割合が増加することを明らかにした。

これを要するに著者は、蓄熱密度が高いパラフィンを用いたエマルジョンスラリー固化率の光による測定手法を提案するとともに、幾何光学や独立散乱を仮定したモンテカルロ法を用いたふく射輸送解析手法を開発し、さらに、パラフィン内部での光反射を考慮して光強度とパラフィン形状との関係を明確にしており、顕熱蓄熱システムの高効率化によるエネルギー有効利用技術の進歩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。