

## 審査の結果の要旨

氏名 武藤 昌也

本論文は、「高ストークス数乱流場における固体粒子の流体抵抗力および固気二相間の干渉についての研究」と題して、5章から構成されている。

産業プロセスにおける省エネルギー対策や地球環境への負荷低減を目的として、近年、産業機器の高効率化や低排出ガス化が要求されている。その中で、噴霧や微粉炭燃焼における燃料微粒子の詳細な空間分布予測が重要となってきた。通常、複雑な形状を持つ燃焼器内乱流場では実験的な計測や予測を行うことが容易でないことから、乱流場と微粒子運動の間の運動量干渉を考慮した数値解析による予測手法の確立が進められている。従来、固気二相流中の粒子にかかる支配的な力は重力と流体抵抗力であることが知られている。そして、流体抵抗力の算出には、一様流中で単一粒子を用いた実験計測に基づく Schiller & Naumann の抵抗係数（以下、従来の抵抗係数と呼ぶ）が適用される。しかしながら、この抵抗係数には、粒子周囲の乱流場による影響が考慮されていない。それゆえ、例えば自動車用ガソリンエンジンの直噴インジェクタに見られるような、粒子径と流れ場のコルモゴロフスケールによって定義されるストークス数がおよそ  $10^3$  の場合は、乱流場に粒子径よりも小さな速度変動が含まれるため、粒子近傍の流れ場や流体抵抗力への影響を調べる必要性が生じる。従来研究ではストークス数がおよそ 1 の条件下での研究が多く、およそ  $10^3$  の条件下の研究での固気二相間の干渉機構については十分な説明がされていない。

そこで本論文では、ストークス数がおよそ  $10^3$  となるような固気二相流の固体粒子運動に注目し、粒子の流体抵抗力の変化を一様な層流中の場合と比較して評価し、その変化の機構について検証する。なお、乱流中における流体抵抗力の評価は実験的な手法を用いて行い、流体抵抗力の変化の機構については数値解析を用いて検証を行っている。

第1章の序論では、本研究で対象とする産業プロセス中の固気二相流の特徴を述べ、従来の粒子運動予測に用いられる抵抗係数について解説している。その後、乱流場における固気二相間の干渉機構の解明を目指した近年の既往研究について述べている。これらを踏まえ、従来研究における課題を明らかにし、本研究の意義と目的について述べている。

第2章では、本研究で対象とする、ストークス数がおよそ  $10^3$  となるような乱流場の実験条件を生成するための、実験手法について述べている。本手法では、4本の回転格子による箱型乱流生成装置を用いて、平均流が小さく等方的な性質を有する気流定常乱流場を、 $50\text{ mm} \times 570\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  の空間領域で生成している。当領域での積分長さスケールはおよそ  $30\text{ mm}$  であり、コルモゴロフスケールは、格子回転数に伴う乱流場の変化により、 $0.3\text{ mm} \sim 0.1\text{ mm}$  の間の値を取ることが示されている。そして、本装置においておよそ  $2\text{ mm}$  の粒径の粒子を用いることで、ストークス数がおよそ  $10^3$  の実験条件を再現できると述べている。

第3章では、粒径が  $2\text{ mm}$  の固体粒子を用いてストークス数がおよそ  $10^3$  となる実験条件を生成し、固体粒子が乱流中を静止状態から自由落下するときの落下速度計測実験につい

述べている。計測結果から、粒子落下速度が従来の抵抗係数に基づく速度の予測値に対して大きくなり、本実験条件下では流体抵抗力が減少することが示されている。さらにこの原因として、ストークス数がおおよそ  $10^3$  の実験条件下では、乱流場のコルモゴロフスケールが粒子径に対して  $1/10$  程度となり、粒子近傍の境界層厚さと同程度の大きさとなる。そのため、乱流場の微小な変動速度が粒子近傍の流れ場と干渉することによって、流体抵抗力の減少が生じたと推測している。しかし、本章の最後に、粒子近傍の流れ場を実験的に直接計測することは困難であるため、数値解析を用いて二相間の干渉解析を行う必要があると述べている。

第 4 章では、第 3 章で計測された粒子の流体抵抗力の減少に寄与する乱流場の長さスケールを調べるために、乱流場を単純モデル化し、一様流中の球周りに単一周期的変動速度を与える数値解析を行ったことについて述べている。数値解析の結果、変動速度によって生成されるストークス層厚さが球の境界層厚さの 2 倍以下となるときに、流体抵抗力が従来の抵抗係数による予測値に対して減少することが示されている。この減少の原因は、変動速度により主に境界層内の速度分布が時間的に大きく変動し、時間平均された境界層内の速度分布の勾配が一様流中の場合と比較して小さくなることによって、流体抵抗力の成分である摩擦抵抗力が減少するためであると述べている。さらに、以上の解析結果と従来の一様等方性乱流場の統計的性質に関する知見に基づき、実験計測における流体抵抗力の減少についての考察を述べている。この考察によると、粒子の境界層内の速度分布に影響を与えて摩擦抵抗力の減少に寄与する渦は、最も数密度の大きいコルモゴロフスケールの 8 倍程度の直径の渦であると考えられる。コルモゴロフスケールとストークス層厚さの間に比例関係を仮定すると、結果的に流体抵抗力の減少条件がコルモゴロフスケールと球の境界層厚さの比によって表されることが示される。そして、第 3 章の実験結果と従来の固気二相流の実験的研究結果を踏まえ、流体抵抗力が減少する具体的な条件は、乱流場のコルモゴロフスケールに対する境界層厚さの比がおおよそ  $1/6$  以上であることを見積もっている。

第 5 章は総結論である。本章では、本研究で対象とした固気二相流中の固体粒子に作用する流体抵抗力について、ストークス数がおおよそ  $10^3$  となる乱流気流中における実験的評価と、乱流気流場を単純モデル化した数値解析を行った結果、流体抵抗力が変化する機構と物理条件に関して得られた新たな知見を総括している。

以上のように、本論文では、ストークス数がおおよそ  $10^3$  となるような固気二相乱流場における固体粒子の流体抵抗力を正しく評価することを最終的な目的として、一様な層流中の場合に対する乱流中での流体抵抗力の変化を評価し、その変化の機構解析を行っている。その結果、流体抵抗力は一様な層流中の場合に対して減少することが実験より明らかにされ、その原因は摩擦抵抗力の減少によることが数値解析に基づいて示された。さらに、減少が発生する物理条件についての有用な知見が提供されている。以上より、本研究は機械工学、特に流体工学の混相流分野における理論発展に寄与するところ大であると言える。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。