

論文の内容の要旨

論文題目 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
氏名 武藤 昌也

1. 序論

近年、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背景とした、産業機器の高効率化や低排出ガス化が求められる中で、噴霧や微粉炭燃焼における多数の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ため、乱流場と微粒子運動の間の運動量干渉を考慮に入れた、数値解析による予測手法の確立が進められている。一般的に、固気二相流における粒子運動では重力と流体抵抗力が運動の主要因であり、流体抵抗力の算出には、一様流中で単一粒子を用いて行われた、実験計測に基づく Schiller & Naumann の抵抗係数[1]（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。そのため、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、粒子の粒径と流れ場のコルモゴロフスケールを用いて定義されるストークス数が、およそ 10^3 となる時は、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があると考えられる。従来研究として、ストークス数がおよそ 1 の条件下での研究が多く[2]、およそ 10^3 の条件下での研究[3, 4]では、固気二相間の干渉機構についての十分な説明がなされていない。

そこで本研究では、ストークス数がおよそ 10^3 となるような固気二相流における固体粒子運動に注目し、一様な層流中の場合に対する粒子の流体抵抗力の変化を比較し、その変化の機構に関する研究を行った。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、流体抵抗力の減少機構の解析は数値解析を用いて行った。

2. 回転格子を用いた一様な乱流場の生成

メッシュサイズが 25mm であるような 4 本の回転格子による箱型乱流生成装置（図 1）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 mm × 570 mm × 100 mm の空間領域で生成した。当領域での乱流統計量として、積分長さスケールはおよそ 30 mm で一定であり、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 mm ~ 0.1 mm の間の値を取る。そのため、本装置において、およそ 2 mm の粒径の粒子を用いることで、ストークス数が 10^3 の状況を再現できる。また、本装置による乱流場では、乱流レイノルズ数が最大で 250 となる。

3. 乱流場における粒子にかかる流体抵抗力の評価

前節の実験装置と粒径が 2 mm の固体粒子を用いて、ストークス数がおよそ 10^3 のとなる実験条件を生成し、固体粒子が乱流場を静止状態から自由落下するときの落下速度を計測した（図 2）。その結果、図 3 に示すように、従来の抵抗係数に基づく速度の予測値（図 3 の破線）に対して、落下速度は大きくなり、本実験条件では流体抵抗力が従来の予測に対して小さくなることが分かった。ストークス数がおよそ 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、粒子近傍にて見積もられる境界層厚さと同等の大きさとなる。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される。しかし、個々の粒子近傍の流れ場を直接計測することは困難であるため、数値解析によって、二相間の干渉を解析を行う。

4. 周期変動が与えられた球周りの流れ場についての数値計算を用いた解析

前節で計測された粒子の流体抵抗力の減少に影響を与えた乱流場の長さスケールを調べるために、粒子周りに二通りの方法（図 4(1a), (1b)）で単一周期変動を与えた数値解析を行った。解析には、図 4(1b)に示すような球を含む円筒形解析格子を用いた。解析の結果、図 5(1)に示すように、周期変動によるストークス層厚さ δ_s が球の境界層厚さ δ_b 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（図 5(1)内の破線）に対して減少した。この減少の原因は、周期変動による変動エネルギーが球近傍に集中することによる（図 5(2a)）、流体抵抗力の成分である摩擦抵抗力の減少に起因することが分かった。また、この摩擦抵抗力の減少は、変動の与え方（図 4(1a), (1b)）に依存しない。

さらに、以上の解析結果に基づき、実験計測における流体抵抗力の減少について考察を行った。前節で用いた一様な乱流場において、粒子近傍の流れ場に影響を及ぼす渦は、最も数密度の大きいコルモゴロフスケール η の 8 倍程度[5]の直径の渦であると考えられる。そこで、定数 α を用いて $8\alpha\eta = \delta_s$ とすると、 $8\alpha\eta \leq 2\delta_b$ となるときに流体抵抗力が減少すると考えられる。本研究の α は、前節の実験結果および従来研究[3, 6, 7]を用いて、流体抵抗力が減少する δ_b / η の範囲から同定を行った。その結果、流体抵抗力が減少する範囲はおおよそ $\delta_b / \eta > 1/6$ であると見積もられる（図 6）。本研究の実験計測条件では、 $\delta_b / \eta \sim 1$ であり上記の関係を満たす。そのため、摩擦抵抗力の減少に伴う流体抵抗力の減少が生じたと考察される。

5. まとめ

本研究により、ストークス数が非常に大きく（ $\sim 10^3$ ）なるような固気二相乱流場では、粒子の流体抵抗力が、従来の抵抗係数による予測値に対して減少することが分かった。また、その減少は摩擦抵抗力の減少によるものであることが示され、減少が発生する物理的な条件が従来研究を用いて見積もられた。今後は、この知見に基づく、乱流場におけるより高精度な粒子運動の予測が期待される。

参考文献

- [1] Schiller, L. & Naumann, A., *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure.*, 77, 1933, pp. 318-320.
- [2] Wood, A.M., Hwang, W. & Eaton, J.K., *Int. J. Multiphase Flow.*, 31, 2005, pp. 1220-1230.
- [3] Friedman, P.D. & Katz, J., *Physics of Fluids.*, 14(9), 2002, pp. 3059-3073.
- [4] Warnica, W.D., Rensizbulut, M. & Strong, A.B., *Experiments in Fluids.*, 18, 1995, pp.265-276.
- [5] Tanahashi, M., Kang, S.-J., Miyamoto, T., Shiokawa, S. & Miyauchi, T., *International Journal of Heat and Fluid Flow.*, 25, 2004, pp. 331-340.
- [6] Kawanishi, K. & Shiozaki, R., *Journal of Hydraulic Engineering.*, 134(2), 2008, pp. 261-266.
- [7] Terada, J., Ushijima, T. & Kitoh, O. *Proceedings of 7th JSME-KSME Thermal Fluids Engineering Conference.*, J333, 2008.

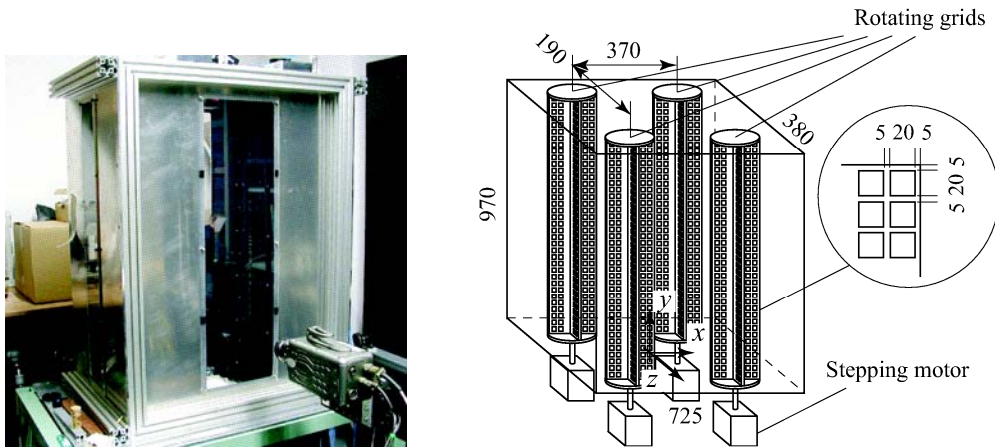


図1 乱流生成装置概要図 (左:外観, 右:回転格子の配置)

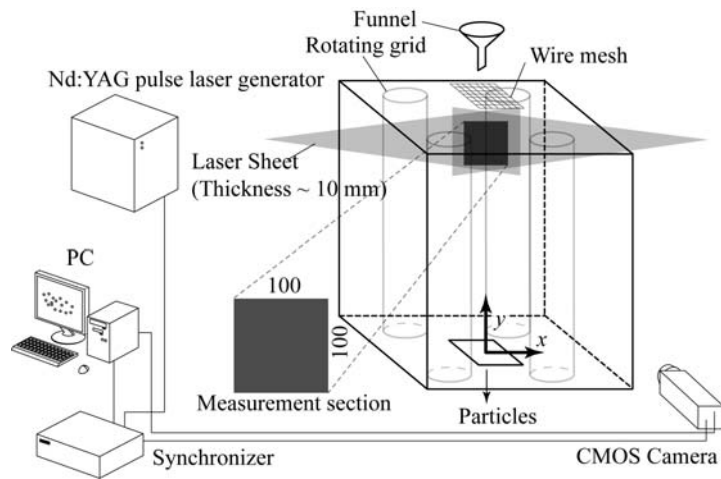


図2 粒子落下速度計測システム

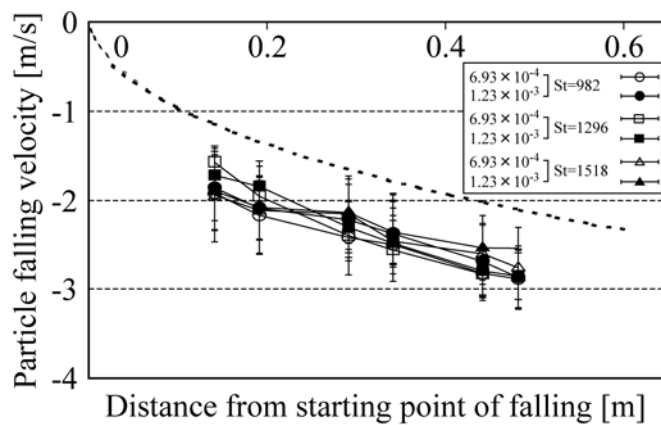


図3 乱流場における粒子落下速度変化

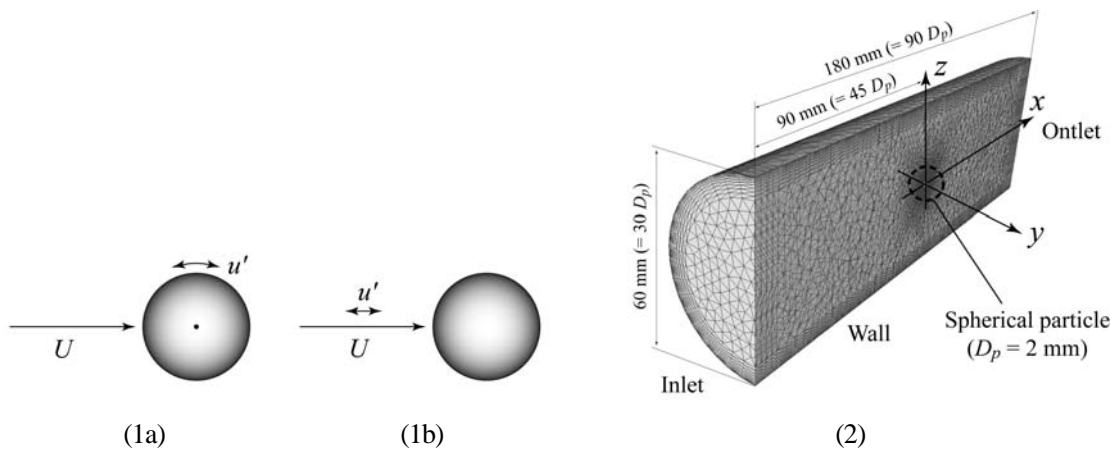


図4 周期変動を与えた球周りの数値解析 (1a: 周期変動の概要, 1b: 解析格子)

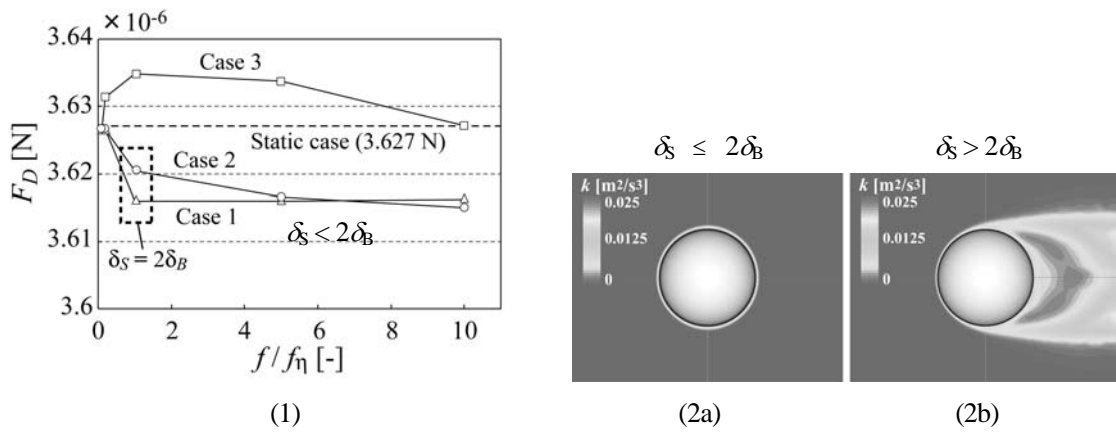


図5 周期変動を与えた球周りの変動エネルギー分布と δ_s の大きさによる流体抵抗力の減少

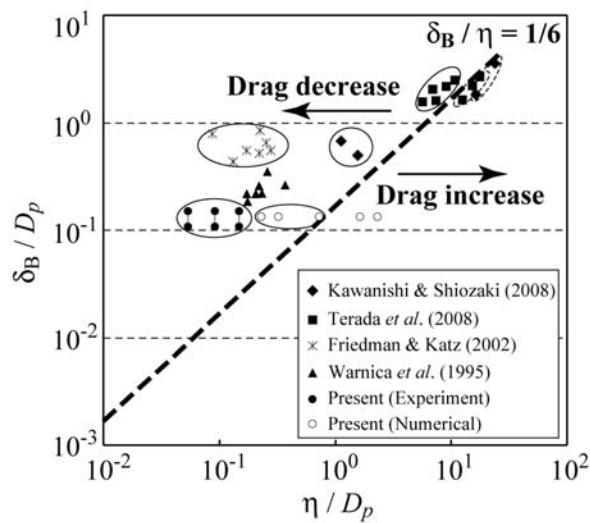


図6 粒子の流体抵抗力が減少する物理条件の解析結果