

乱流中における固体粒子の沈降に関する実験的研究

An experimental study of particle settling in turbulence

落合 清勝 [1], 小屋口 剛博 [1]

Kiyokatsu Ochiai [1], Takehiro Koyaguchi [2]

[1] 東大・地震研

[1] ERI, Univ. Tokyo, [2] ERI Univ Tokyo

噴煙から火砕物が降下するメカニズムを理解するために、粒子降下実験を行った。実験では、乱流の強度を系統的に変化させた。また、自由境界底面を通して粒子を降下させる実験を行った。実験結果から、粒子の終端速度に対する乱流の強さが弱くなるにつれて、粒子濃度の減少する割合は、粒子濃度が均一であるという仮定による予測値よりも大きくなるという結果を得た。また、自由境界底面を通して粒子が降下する場合、粒子濃度の減少する割合は、固体底面を持つ場合の実験値よりも小さくなることがわかった。粒子濃度の減少する割合が大きいものは、粒子の存在により乱流が抑制され、実質的な粒子の渦拡散係数が小さくなったと考えられる。

噴煙の挙動を推定する上で、乱流中を沈降する粒子と流体との相互作用およびダイナミクスを理解することは重要である。乱流状態で上昇拡大する噴煙からの火砕物の分離のモデルとして従来はMartin and Nokes(1988)の乱流対流中の粒子降下のモデルが用いられてきた。Martin and Nokesのモデル(MNモデル)は、底面が固体壁の実験に基づき、(1)底面では乱流の強さが0になる、(2)粒子の終端速度に対する乱流の強さが充分強く、粒子濃度が流体内部で均一である、という仮定のもとに良い近似を得るモデルである。しかし、噴煙は自由境界底面を持ち、(1)の条件を満たさないため、自由境界底面を通して降下する火砕物にそのまま適用できるかは自明ではない。また、粒子の終端速度に対する乱流の強さが弱い状況では(2)の仮定が成り立たず、粒子の降下量はどの程度になるかということがはっきりしなかった。そこで、本研究では自由境界底面を持つ場合と固体底面を持つ場合の粒子降下実験を、乱流の強度を系統的に変化させて行い、その結果を比較した。粒子の減少する割合の変化を比較するに当たって、乱流拡散による粒子のfluxと沈降によるfluxが釣り合うという関係に基づくモデル(一般化モデル)をたて、乱流がそれほど強くない状況でも成り立つよう一般化を行った式を導出し、この式と得られた実験結果を比較した。

実験では、水槽内に密度の異なる流体を成層させ、自由境界底面を持つ流体層を作成し、その上層のみを乱流状態に保ち、上層での粒子濃度がどの程度の割合で減少するかを測定した。実験はビデオカメラで録画し、画像の輝度を測定することにより、粒子濃度の時間変化を求め、粒子濃度の減衰係数を得た。乱流を発生させるには、気泡が上昇するときの流れを利用し、送り込む空気量を系統的に変化させて、水槽内の流速を変化させた。この流速を、あらかじめ水槽高さ方向についてレーザードップラー流速計で測定し、流速の変動値のroot mean squareを乱流の強度とした。粒子は球形ガラスビーズを用い、粒径の異なるものについてそれぞれ実験を行った。流体の動粘性を変えた実験を行い、粒子濃度の減少に対する動粘性の影響を検討した。

実験から得られた粒子濃度減衰係数が、粒子の終端速度を乱流強度で割った値 S (粒子が終端速度で降下する割合と乱流により拡散される割合の比を表す)に対してどのように変化するかを比較し、以下の結果を得た。

(1) $S = 1$ の場合、粒子濃度減衰係数は、MNモデルから予測される値に近づく。 S の値が増加するに従い、粒子濃度減衰係数は、MNモデルから予測される値よりも大きくなり、最高で3倍程度大きくなる。この結果は、 S の増加とともに、乱流により粒子を拡散させる効果が相対的に小さくなると考えることによって説明される。これらの実験結果を、一般化モデルを用いて定量的に解析した結果、粒子濃度減衰係数は、粒子が無い条件で求めた乱流拡散係数を用いて予測した値よりも大きい値をもつことがわかった。この原因として、粒子が存在することにより乱流が抑制され、実際の乱流拡散係数が小さくなったことが考えられる。

(2) 自由境界底面の粒子濃度減衰係数は、固定底面より小さくなる。この原因として、自由境界底面では境界面が変動し、乱流の強度が0で無い事により、粒子濃度減衰係数が小さくなったことが考えられる。

(3) 粒子濃度減衰係数は流体の動粘性の変化に依存しない。