

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 固気二相自由乱流の渦法シミュレーションに関する研究

氏 名 八神 寿徳

論 文 内 容 の 要 旨

気流中に微小な固体粒子を含む固気二相自由乱流は、微粉炭燃焼器や固体ロケットエンジン、化学反応装置など様々な工業機器において観察される。1970年代に単相混合層における大規模渦の形成および発展過程が明らかにされて以来、組織的な大規模渦と粒子運動の関係に注目が寄せられ、多くの研究が行なわれてきた。最近では、計算機を用いた数値シミュレーションが活発に実行され、実験的研究では得がたい貴重な知見が蓄積されつつある。

一方、固体粒子を含まない自由乱流のシミュレーション手法として、渦法が注目を集めている。渦法は、流れ場の連続的な渦度分布を多数の微小な渦要素により離散化し、各要素の渦度の時間変化を捉えながら要素の挙動を追跡して流れ場を求める、Lagrange型解法である。その特長は、(1)大規模な渦の形成や変形など渦構造の発展過程を直接計算できる、(2)乱流モデルを必要としない、(3)数値積分主体の計算で発散する要因を直接含んでいない、ことなどが挙げられる。最近では、固体粒子を含む自由乱流に対する渦法（粒子と流体の相互作用を考慮できるため、Two-way渦法と呼ぶ）が提案された。その妥当性は、二次元流れ場に対しては、いくつかの解析例を通してほぼ検証されている。しかし、三次元流れ場については、ほとんど検討されていないのが現状である。

本研究では、まず二次元流れ場に対する渦法の妥当性を再確認するとともに、これまで調べられていない二次元物体後流における粒子および気流の挙動を明らかにする。ついで、三次元流れ場として混合層および渦輪をとりあげて解析し、得られた結果と実験結果との比較を通して、解法の妥当性、適用性および有用性を明らかにする。

本論文は、以下の構成からなる。

第1章では、従来の固気二相自由乱流に関する実験的および数値的な研究事例を

調査し、本論文が対象とする研究分野の背景と問題点を述べるとともに、本論文の目的を示した。

第2章では、一様流中におかれた二次元物体の背後に発生する後流を対象として、二次元解析を行なった。後流は、混合層や噴流と同様に自由乱流の代表例であり、単相流について多くの知見が蓄積されている。しかし、固体粒子を含む二相流に関する研究は極めて少なく、粒子質量混合比 m が低い場合を対象にした実験、および粒子と流体の相互作用を無視した数値解析しか見当たらない。したがって、 m が高いときの粒子運動や後流に及ぼす粒子の影響など、不明な点が多い。そこで本研究では、粒子運動の可視化実験に用いられた二次元後流を解析モデルとして選び数値解析した。一様な気流中に平板を設置し、背後の後流中に平板後端から球形ガラス粒子を供給した場合を二次元 Two-way 渦法により数値解析した。平板の厚さは 31.5 mm、粒子直径は 10 および 30 μm であり、Stokes 数 St はそれぞれ 0.15 および 1.4 である。解析で得られた粒子分布が可視化実験による結果と一致することを確認するとともに、つぎの結論を得た。(1) 10 μm 粒子 ($St = 0.15$) は大規模渦の外縁に分布する。 m が増すと大規模渦の強度が低下して遠心力の効果が減じるため、外縁部の粒子数密度がやや低下する。30 μm 粒子 ($St = 1.4$) は大規模渦の周囲に集中して分布し、 m の増加とともに集中する位置が後流中心軸側へ移動する。(2) 後流断面内の気相平均速度の勾配は、 m の増加とともに低下する。ただし、30 μm 粒子の場合の低下量は 10 μm 粒子の場合よりも小さい。(3) 後流断面内の 10 μm 粒子の平均速度は、後流外側と中心軸近傍において気相速度よりも高く、 m が増すと分布が平坦化する。30 μm 粒子の速度分布は 10 μm 粒子の分布よりも平坦である。(4) 気相乱れ強さは、中心軸近傍において m の増加とともに低下する。(5) 10 μm 粒子の乱れ強さは、中心軸近傍において気相よりも低く、 m が増すほど低下する。30 μm 粒子の場合には気相よりもかなり小さく、 m の影響は軽微である。

第3章では、三次元解析に関する研究を行なった。二次元解析では、乱流を特徴づける三次元的な渦運動が精密には計算できない。よって、より詳細な数値シミュレーションには、三次元解析が不可欠である。まず、固体粒子を含まない、気相のみが流れる混合層に対する三次元渦法の妥当性を検証した。混合層とは、異なる速度をもつ流体が合流して生起する混合現象であり、組織的な大規模渦構造が支配的な流れである。混合層の三次元解析に対する渦法の適用例はほとんどなく、時間平均流れ場や乱流強度などの統計量が求められていない。本研究では、合流前の2つの流体の速度比が 0.3 の混合層を三次元渦法により数値解析し、得られた流れの統計量を実験結果と比較することにより、渦法の実用性を調べた。その結果、つぎの結論を得た。(1) 2つの流体の合流位置のやや下流において、スパン方向に中心軸をもつ二次元的な大規模渦が発生し、流下とともに軸が変形して三次元的な渦構造をもつ流れへと発展する、混合層の発達過程を解析できた。(2) 平均速度と流れ

方向乱れ強さが、実験結果と良く一致する結果が得られた。横方向乱れ強さおよび Reynolds 応力は、実験結果の傾向と同様な自己保存分布となるが、実験結果よりもやや過大であった。その原因として、実験条件と完全に一致する初期攪乱を付与できないことと推察した。(3) 大規模渦の通過周波数を良好に解析できた。

第4章では、上述の混合層にガラス粒子（直径 $135\mu\text{m}$ 、密度 2590 kg/m^3 ）を供給した場合を三次元 Two-way 渦法により数値解析した。粒子の分布、速度および乱れ強さ分布について、本解析結果と実験結果を比較し、粒子が気流運動に及ぼす影響や、粒子質量混合比 m が増加したときの気相流れの変化を調べた。その結果、つぎのような結論が得られた。(1) 粒子の分布、速度および乱れ強さの解析結果が実験結果と一致することを確認でき、固気二相平面混合層に対する本解法の有効性を示すことができた。(2) 粒子が気相に攪乱作用を及ぼし、三次元的な流れの発生を促進することを示した。(3) 混合層中心のやや低速側において、粒子により気相の速度が増す。ただし、 m の影響は軽微である。(4) 気相の乱れ強さは、 m の増加とともに大になる。

第5章では、静止空气中を自己推進する渦輪が固体粒子群と衝突する現象を三次元 Two-way 渦法により数値解析した。粒子直径は $50\mu\text{m}$ 、粒子の Stokes 数 St は 0.74 である。渦輪とは、乱流中で現れる典型的な渦構造の一つであるドーナツ状の渦であり、自己誘起速度による移流に伴って物質および運動量を輸送する能力がある。このため、渦輪による粒子の輸送に関する研究例がいくつか報告されている。しかし、その基礎的考察を提供する、渦輪近傍の粒子の運動や渦輪の挙動に及ぼす粒子の影響など、渦輪と粒子の干渉の詳細は調査されていない。そこで本研究では、渦輪と衝突した粒子群の挙動や、粒子群と衝突後の渦輪の強度の変化について調べた。その結果、つぎの結論が得られた。(1) 粒子は、渦輪と衝突した直後、渦輪を取り囲むようにドーム状に分布する。この分布は従来の研究で明らかにされている、 $St \approx 1$ の場合に自由乱流の大規模渦の周囲に現れる、粒子の選択的分布に相当している。(2) 渦輪と粒子群との衝突により、縦渦を表す ω_z が渦輪内部に発生し、流れが三次元化する。 ω_z の符号が周方向に交互に変化する、組織的な縦渦である。ただし、時間の経過とともに ω_z は減衰し、組織的な渦構造も不鮮明になる。(3) 粒子群との衝突により、渦輪の強度は低下し、並進速度も減衰する。

第6章では、本論文で得られた結果をまとめ、今後の課題と展望について述べた。