

氏 名	あずま 東 良 慶
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2458 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科環境地球工学専攻
学位論文題目	開水路固液混相乱流における粒子・流体の相互作用に関する基礎的研究

論文調査委員 (主査) 教授 欄 津 家 久 教授 関 口 秀 雄 助教授 後 藤 仁 志

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、固液混相開水路乱流において、レーザー流速計 (LDA) および粒子軌道追跡法 (PTV) による粒子・流体の瞬間挙動の同時計測法を開発したのち、それを駆使して、土砂輸送機構の最も重要な素過程である粒子・流体間の相互作用に関して実験的に考察したものである。本論文は、以下の 9 章からなっている。

第 1 章は序論であり、本論文の研究意義ならびに研究目的を示しており、また、フローチャートによって本論文の構成を説明した。

第 2 章では、まず、粒子を伴う流れに関する既往研究をレビューし、粒子と流体の同時計測法の開発およびその開発の重要性を説明した。本章では LDA のバースト信号の電圧にしきい値を設けることにより両者を判別分離できることに着目し、LDA 同時計測法の掃流砂流れへの適用を試みた。その結果、砂粒子と水流の同時計測に成功し、掃流層において、水流のレイノルズ応力が減少し、流砂のレイノルズ応力が発生することを明らかにした。この流砂のレイノルズ応力に対する寄与はイジェクション (上昇粒子) よりもスイープ (下降粒子) のほうが大きく、下降粒子によって上方の高運動量が壁面領域に輸送されることを解明した。

第 3 章では、前章で行った同時計測法の判別分離精度をさらに向上させるために、バースト信号の電圧に加え、トランジットタイム (散乱粒子が測定体積を通過する時間) にもしきい値を設け、砂粒子と流体の判別の高精度化を試みた。その結果、流砂のレイノルズ応力は底面から離れるにつれて減少し、また、流砂量の増加に伴いこの流砂のレイノルズ応力が大きくなることを明らかにした。上昇粒子 (イジェクション) よりも下降粒子 (スイープ) のほうが運動量輸送に対する寄与が大きく、この特性は流砂量の増加に伴い顕著となることも明らかにした。

第 4 章では、画像解析手法である PTV による粒子と流体の同時計測を試みた。通常の PTV では粒子の重心位置のみをデータとして使用し、投影面積については取り扱わない。しかし、本研究では対象粒子 (面積大) と流体 (シーディング粒子、面積小) の投影面積の差異に着目し、投影面積データにしきい値を設けることにより、粒子と流体の判別分離を行った。また、粒子追跡アルゴリズムとしてスプリングモデルを適用し、その有用性を確認した。その結果、粒子・流体の同時計測法として非常に有効である投影面積判別 PTV (Discriminator-PTV: D-PTV と略記する) を本研究で開発・確立した。

第 5 章では、前章で開発した D-PTV を壁面近傍領域における計測にも可能なように拡張した。その結果、壁面領域から離れた外層においては、粒子速度が流体速度よりも若干低速であり、逆に、壁面近傍領域においては、粒子速度が流体速度よりも高速となり、粒子速度と流体速度の逆転現象が生じるという注目すべき現象を明らかにした。また、壁面近傍領域では、粒子のスイープ (下降運動) はイジェクション (上昇運動) よりもレイノルズ応力に及ぼす寄与が大きく、この粒子のスイープが壁面近傍の周囲流体に高運動量を逆輸送し、その結果、粘性底層において流速が高速化および一様化することを明らかにした。

第 6 章では、上述の研究をさらに発展させ、粒子・流体間の相互作用が顕著な壁面領域に主眼をおき、周囲流体の平均流

特性および乱流特性に及ぼす粒子の粒径および比重の影響について検討した。その結果、乱れ強度に関して、壁面近傍領域では、粒子によって惹起された乱れが周囲流体の乱れよりも支配的であるため、流下方向および鉛直方向成分ともに清流と比較して乱れ強度が増幅されることを明らかにした。すなわち、壁面近傍は粒子・流体の相互作用が顕著である領域であり、また、この領域ではイジェクションよりもスweepの寄与が大きく、この寄与に及ぼす影響は比重効果よりも粒径効果のほうが大きいことを明らかにした。

第7章では、土砂水理学本来の研究対象である砂（ガラス球）を用い、滑面および粗面開水路における浮遊砂流をD-PTVにより同時計測し、粒子濃度および壁面粗度が粒子・流体の相互作用に及ぼす影響を検討した。その結果、平均流速分布に関しては、粒子濃度の増加に伴ってカルマン定数が系統的に減少することを明らかにした。前章で述べた相対速度の逆転現象がここでも生じ、粒子濃度の増加に伴い相対速度も増加することを示した。壁面近傍領域では壁面粗度の影響により粘性効果が弱まり流速が低減され、また一方で、粒子は粗度との衝突などにより速度が低速化し、その結果、不完全粗面のほうが水理学的滑面と比較して相対速度が小さくなると説明された。乱れ強度の変調に関しても、不完全粗面の方が水理学的滑面よりも変調が小さくなったが、これは壁面近傍領域では流体・粒子の運動が粗度効果により低減され、その結果、乱れ強度の変調も減衰されると考えられる。

第8章では総合的考察として、本研究で得られたカルマン定数と粒子濃度に関する実験結果を総括し、カルマン定数の系統的な減少特性を明らかにした。また、カルマン定数の減少特性に関して著名な日野理論との比較を行い、その妥当性や適用限界を検討した。粒子濃度が小さい場合、本実験結果は日野の理論式と良好に一致したが、粒子濃度が大きい場合、理論式からずれる結果となった。このことから、日野の理論式の改良あるいは新たな理論の展開が求められ、そのために、さらなる高精度な実験データの蓄積が必要であると言及した。

第9章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、開水路固液混相乱流における粒子と流体の同時計測法を開発したのち、これを駆使して、粒子と流体の運動特性を詳細に解明し、粒子・流体の相互作用に関して総合的に考察したものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 掃流砂を伴う開水路流れにおける水と砂粒子の運動特性に関する研究では、レーザー流速計（LDA）による粒子・流体の同時計測法を開発し、流砂量の増加に伴い流砂のレイノルズ応力が増加することを明らかにした。また、上昇粒子よりも下降粒子のほうが運動量輸送に対する寄与が大きく、この運動量輸送が流砂量の増加に伴い増大することを明らかにした。
2. 開水路固液混相乱流における固体粒子と流体の相互作用および乱れ特性に関する研究では、粒子軌道追跡法（PTV）による粒子・流体の高精度な同時計測法を開発した。この計測法は可視画像上の粒子投影面積にしきい値を設けることによって粒子と流体を判別分離するものであり、壁面近傍領域の計測も可能で画期的である。これにより、壁面近傍領域において粒子速度が流体速度よりも高速となるという注目すべき現象を明らかにした。
3. 平均流特性および乱流変調に及ぼす粒径と粒子比重の影響に関する研究では、上述の粒子投影面積判別PTV（Discriminator-PTV:D-PTV）による計測によって、壁面近傍領域においては、粒子の存在によって惹起された乱れが周囲流体の乱れよりも支配的であるため、乱れ強度（速度変動のRMS値）が増幅されることを明らかにした。また、この壁面近傍領域では下降粒子（スweep）のほうが上昇粒子（イジェクション）よりもレイノルズ応力への寄与が大きく、この寄与に及ぼす影響が比重効果よりも粒径効果のほうが大きいことを明らかにした。
4. 浮遊砂乱流に及ぼす粗度効果の影響に関する研究では、D-PTVによって、粒子・流体の相互作用が粗度効果によって減衰されることを明らかにした。また、従来から指摘されている浮遊砂流中のカルマン定数の減少特性について、粒子濃度を系統的に変化させて実験的に検討した。その結果、カルマン定数の変化特性に関する日野理論との比較を行い、その妥当性や適用限界を実験的に検討した。

以上、本論文は、開水路固液混相乱流における粒子と流体の同時計測法を開発したのち、それを駆使して、粒子・流体の相互作用に関する注目すべき基礎的知見を得たものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文

は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。