

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	姚 奇峰
論文題目	Experimental Investigation and Statistical Analysis of Entrainment Rates of Particles in Suspended Load 浮流粒子の連行率の実験的研究および統計的分析		
(論文内容の要旨)			
<p>さまざまなタイプの流体による堆積物運搬作用の中でも、浮流は最も重要なプロセスの一つである。浮流砂移動量の定量的な予測は、惑星科学や深海の堆積作用の研究において極めて重要な研究課題となっている。一般に、浮流砂の時空発展のモデリングは移流拡散方程式によってなされるが、その際に、底面近傍における堆積物の沈降率に加えて連行（巻き上げ）率の見積りがモデル化のカギとなる。したがって、地形動力学モデルを構築するため、浮流砂連行関数を得る研究が多く行われてきた。</p> <p>しかしながら、これまで提案されてきた浮流砂連行関数には、いくつかの未解決な問題が残っている。まず、(1) これまでの研究における統計的検討は不十分なものであった。既存研究では線形回帰によって経験的関数が求められていることが多いが、その関数にどのパラメータを採用すべきであるかについては、恣意的にごくわずかの数が試されているに過ぎない。加えて、採用しているパラメータ数が異なるにもかかわらず、既存研究による関数同士の比較は情報量基準ではなく残差二乗和によってのみ行われている。第二に、(2) これまでの研究では、開水路流れのデータと密度流のデータを混在させて解析が行われている。開水路流れと密度流では鉛直流速分布が異なるため、堆積物の拡散作用も大きく異なる可能性がある。第三に、(3) 混合粒径堆積物の連行関数の検討が不十分である。既存研究では、連行関数が異常なフラックスを示さないように、人為的な飽和濃度パラメータが導入されている。この飽和濃度は、本来は合計の濃度に対して適用されるべきものである。しかし、既存研究における混合粒径の取り扱いでは、それぞれの粒径階のための連行関数にも飽和濃度が適用されてしまっている。したがって、計算結果はしばしば非合理的なものとなっていた。また、そもそも混合粒径のための連行関数を求めるための実験データも極めて限られたものであり、得られている関数の精度にも問題があった。</p> <p>これらの問題を解決するため、本研究は開水路流れと混濁流の両方に適用可能な新しい浮流砂連行関数を作り出すことを目的としている。そのため、新たな水槽実験が均一粒径・混合粒径の連行関数を求める目的で実施された。新しい関数を得るためには、重回帰分析を利用した。本研究は重要な支配無次元数を排除しないため、これまで提案されてきたすべてのパラメータの組み合わせを試し、赤池情報量基準および交差検証によって最も優れたモデルを選択している。</p> <p>統計的解析の結果、本研究は新しい連行関数を均一粒径・混合粒径それぞれの堆積物のために作り出した。新しい関数の形式は単純であり、連行率はこれまで最も重要なパラメータとされてきた摩擦速度／粒子沈降速度比<math>u_* / w_s</math>の2～3乗に比例するものとなっている。この結果は、既存研究の理論的考察と整合的である。本研究の結果は、既存研究で未解決であった三つの課題の解決にも貢献する。すなわち、(1) 情報量基準と交差検証により、既存のどの関数よりも汎化性能に優れた関数が生み出された。(2) 解析の結果、開水路と混濁流では連行関数の形式が異なることが明らかになった。このことは、開水路で作りに出した浮流砂連行関数は混濁流への適用には向かないかもしれないことを意味している。さらに、(3) 混合粒径に適用可能で、人為的な飽和浮流砂濃度値を持たない新しい連行関数を作り出された。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文の研究は、申請者自身および既存研究の実験および観測結果に対して統計的解析を行い、新しい浮流連行関数を提案している。浮流とは、乱流によって流体中に土砂が拡散することで起こる土砂の輸送プロセスであり、河川や深海底における堆積・侵食・土砂運搬作用を考える上で最も重要な作用である。浮流は陸域から海洋への土砂輸送の約90%を担っている。この浮流による土砂輸送量を予測するときには鍵となるのが、底面堆積物の連行速度の見積りである。連行速度とは、底面に堆積している土砂が流れへ取り込まれるフラックスであり、この浮流砂連行速度と沈降速度の差が浮流砂の運搬量の時間変化となる。すなわち、浮流砂連行関数は、浮流砂輸送のモデリングに関して最も基礎となる部分といえる。

そのため、浮流砂連行速度に関する経験式・半理論式はすでに数多く求められている。しかし、これまで数多く提案されてきたモデル同士の比較は統計的に見て極めて不十分であり、どの式がもっとも汎化性能が高いのかについては不明確なままであった。流れの水理条件や堆積物の物性に関するパラメータは数多くあるが、どのパラメータを使用し、どのような形の関数を使えば浮流砂の連行量を的確に見積もることができるのかについては、現在でも多くの論争が続いている。

本学位申請論文は、この問題に対して、情報量基準及び交差検証を用いた統計的モデル選択というアプローチで取り組んでいる。これによって、従来のパラメータ数・関数形を先験的に決定してきた研究とは異なり、本学位申請論文研究ではそれらが後験的に決定されるようになっていく。この点が、従来の研究と比べた本研究の独自性である。また、既存研究で用いられている測定データは開水路、すなわち水面が大気と接している流れに偏っており、しかも単一の粒径のみで堆積物が構成されているものばかりであった。そのため、本学位申請論文では密度流の水路実験に取り組んでおり、しかも複数の粒径が混合した堆積物を用いた実験も行っている。これらの点についても、本学位申請論文は貴重なデータを提供するものといえるだろう。

結果として、本研究は従来の研究と比較して、明らかに汎化性能に優れた連行関数を提案することに成功している。また、得られた関数は純粋に経験的なものであるがゆえに、既存の理論的な研究の主張を検証することもできるようになっている。特に、新たに得られた開水路流れの浮流砂連行関数は多くのデータに基づいており、その信頼性が高い。さらに、本研究は、開水路流れと混濁流では浮流砂連行関数が大きく異なることも明らかにした。これは、従来の研究ではほとんど予測されていなかった現象である。この原因については今後の研究による解明が待たれるところであるが、当該研究分野には大きなインパクトを与える結果となっている。

本学位申請論文研究によって得られた関数は既存研究にくらべて性能が高く、しかも形式がシンプルであるため、数値モデルに組み込んで使用することも容易である。今後は、提案された関数を組み込むことで、例えば津波による土砂移動量を見積もることが高精度で可能になるだろう。このことは、津波堆積物から過去の津波規模を見積もる逆解析へ極めて有益である。また、深海底で起こる混濁流と呼ばれる流れは浮流砂の与える過剰密度によって駆動されており、その挙動予測についても本学位申請論文の成果が大きく貢献することだろう。

以上のことから、本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値あるものと認められる。また、令和元年7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。

要旨公表可能日： 2019年 10月 1日以降