

固体粒子浮遊流の数値解析における粒子の連行係数

福島工業高等専門学校 建設環境工学科 正会員 ○ 菊地 卓郎

長岡技術科学大学 環境・建設系 正会員 福島 祐介

1. はじめに

自然界には様々な固体粒子浮遊流が存在する．周囲流体が空気の場合には固気二相流と呼ばれ，周囲流体が液体の場合には固液二相流と呼ばれる．それぞれの代表的な例として雪粒子が輸送される吹雪流，河川における浮遊砂流がある．吹雪流と浮遊砂流は周囲流体の違いはあるものの，数多くの共通項がみられる．両者を固体粒子の輸送問題として捉えた場合には，同じ方程式を用いることができる．このような固体粒子浮遊流を解析する有力な手法の一つとして乱流拡散方程式を用いる方法がある．この手法を用いる場合には底面における濃度の境界条件の設定が重要となる．浮遊砂流においては砂の連行係数を用いることの合理性が報告されている．一方，吹雪流を解析する場合にも砂の連行係数と同様な概念に基づいた雪の連行係数が有効であるが，その値を定量的に評価するには至っていない．

本研究は吹雪流と浮遊砂流について，統一的な扱いができる数値モデルを用いて数値解析を行った．さらに，固体粒子浮遊流の解析に乱流拡散方程式を用いた場合に重要な連行係数について検討を行った．

2. 数値解析モデル

数値解析モデルは固体粒子浮遊流において精度よく流れを再現できる $k - \varepsilon$ 乱流モデルを採用した．基礎方程式は，連続式，レイノルズ方程式，乱流拡散方程式，乱れ運動エネルギー k ，分子粘性逸散率 ε についての方程式である．

3. 吹雪流と浮遊砂流

吹雪流と浮遊砂流は共通項が多く，近い関係にあるが，両者の違いも存在する．まとめると以下のようなものである．

1. 周囲流体が吹雪流では空気，浮遊砂流では水で

ある．

2. 輸送される固体粒子が吹雪では雪粒子，浮遊砂流では砂粒子である．

3. 浮遊砂流には水面が存在するが，吹雪流ではそのような境界は存在しない．

数値解析においては固体粒子の沈降速度，流体中における相対比重，境界条件といった両者の違いを考慮し，解析を行った．

4. 数値モデルの検証

図-1, 2 は浮遊砂流の解析の一例として，Vanoni の実験結果 Run2 における流速分布と濃度分布についての実験結果と解析結果を比較したものである．流速分布，濃度分布ともに実験値との良好な一致がみられる．流速分布と濃度分布から浮遊砂流の特徴である濃度の増加とともに流速勾配が急になるという現象を的確に再現できることが確認された．

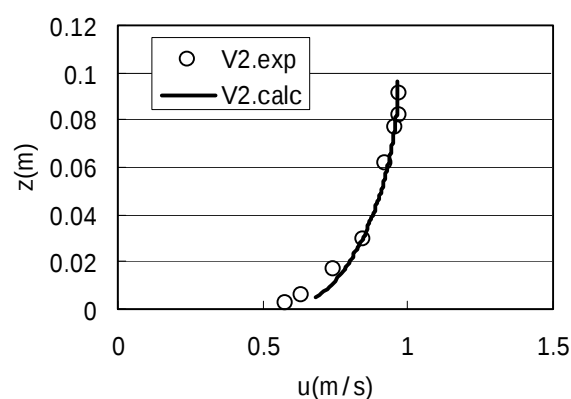


図-1 浮遊砂流における流速分布

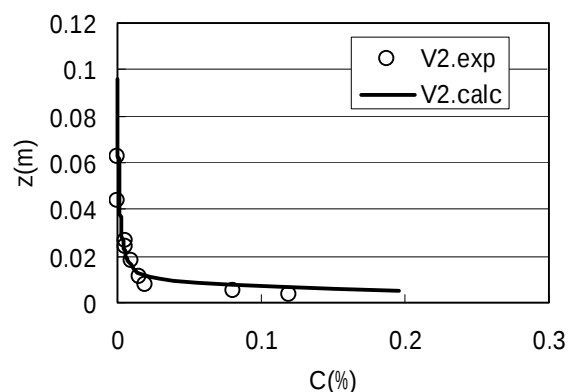


図-2 浮遊砂流における濃度分布

キーワード : 吹雪流，浮遊砂流，乱流拡散方程式，雪の連行係数，砂の連行係数

連絡先：〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30
福島工業高等専門学校 TEL 0246-46-0834

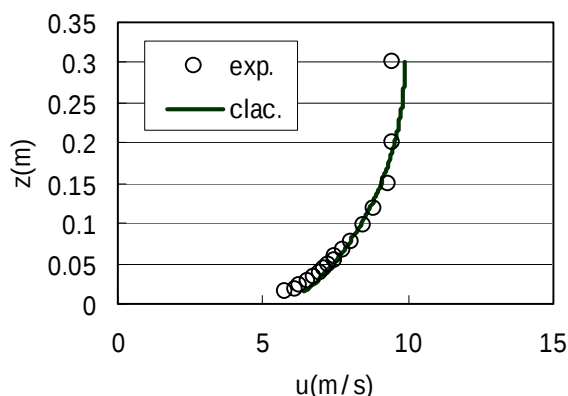


図-3 吹雪流における風速分布
(低温風洞実験)

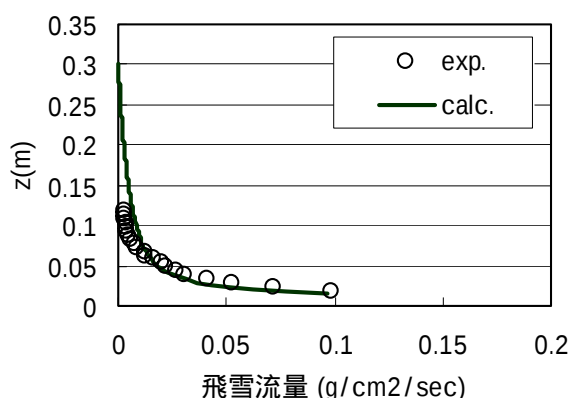


図-4 吹雪流における飛雪流量分布
(低温風洞実験)

吹雪流においては低温風洞実験および南極みずほ基地で観測された風速分布と飛雪流量分布のデータとの比較を行った。図-3, 4は風洞実験における観測値と解析結果を比較したものの一例である。風速分布は実験値との良好な一致を示しており、平板上の乱流境界層の風速分布の特徴をよく表しているといえる。飛雪流量分布も風速分布と同様に解析値の一致は良好であり、底面から急激に減少している。これは周囲流体である空気密度に比べ、固体粒子である雪粒子の密度がはるかに大きいためである。以上、これらの結果によって、本モデルが吹雪流、浮遊砂流ともに流動特性を説明できることが確認された。

5. 連行係数の評価

乱流拡散方程式に対する底面における濃度の境界条件は浮遊流においては濃度フラックスを粒子の沈降速度で無次元化した砂の連行係数を用いることの合理性が報告されている。Garcia¹⁾は砂の連行係数 E_{sa} に関して、底面におけるせん断応力、粒子レイノルズ数 R_p 、粒子の沈降速度 w_s の関数である精度の高い経験式(1)を提案している。

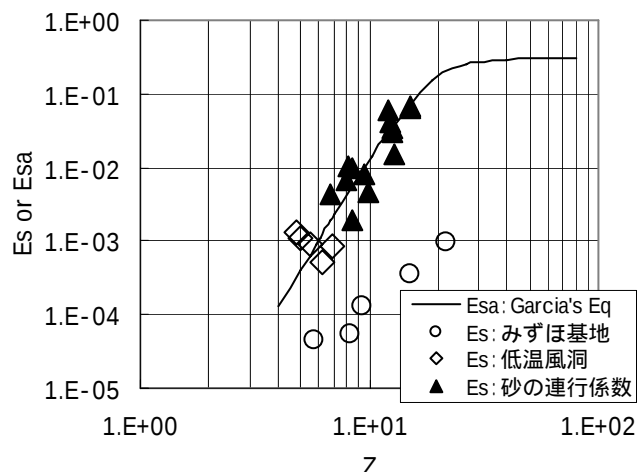


図-5 連行係数と Garcia の経験式との比較

$$E_{sa} = AZ^5 / \left(1 + \frac{A}{0.3} Z^5 \right) \quad (1)$$

$A = 1.3 \cdot 10^{-7}$, $Z = R_p^{0.6} u_* / w_s$, $u_* = \sqrt{\tau / \rho_w}$ は底面での摩擦速度である。吹雪流に関しても砂の連行係数と同様な概念に基づいた雪の連行係数 E_s を用いることが有効であり、その値は流れの特性量と雪粒子の特性量の関数となることが期待されるが、明確な関係式を見出せてはいない。吹雪流、浮遊砂流ともに流れが等流であると仮定すると底面に最も近い高さにおける濃度 c_b が連行係数となる。連行係数を Z に対して示したのが図-5である。図中の実線は式(1)の Garcia の式である。風洞実験における雪の連行係数と砂の連行係数は Garcia の経験式に良く一致した結果となった。一方、南極みずほ基地における雪の連行係数は同じ Z に対しても2オーダーほど小さい結果となった。これは低温風洞実験と南極みずほ基地における観測条件の違いや空気流のスケールの違いによるものであると考えられる。

6. 結論

吹雪流と浮遊砂流の両者に適用できる数値モデルを用いて、モデルが流動特性をよく再現することができることを示した。乱流拡散方程式を用いる際に重要な連行係数を求め、その値を Garcia の提案する経験式と比較することによって、吹雪流と浮遊砂流の底面における濃度の境界条件についての相違について示した。今後は空気流のスケールによる雪の連行係数の違いなどを検討し、関数形を定める必要がある。

参考文献

- 1) Garcia, M., 1990, Univ. of Minnesota, Project Rep.306, p.179.