飛砂の数値解析における砂の連行係数について

福島工業高等専門学校　都市システム工学科　正会員　○菊地　卓郎
福島工業高等専門学校専攻科　社会環境システムコース　学生会員　佐藤　広樹
長岡工業高等専門学校　環境都市工学科　正会員　衞藤　俊彦
東京建設コンサルタント　河川計画部　正会員　大澤　範一

1. はじめに

飛砂は海岸林や農地の埋没，道路への堆積など様々な問題を引き起こす現象であり，海岸を管理する上で飛砂を制御することは重要である．また，同じような自然界における固体粒子輸送の問題は冬期の吹雪や河川における浮遊砂がある．これらは周囲流体や固体粒子の違いはあるものの，数多くの共通項がみられ，同じ方程式を用いることができ，その手法の一つとして乱流拡散方程式を用いる方法がある．この手法を用いる際には底面における濃度の境界条件が重要となり，浮遊砂では砂の連行係数を用いることの合理性，吹雪でも同様な概念に基づいた雪の連行係数の有効性が報告されているが，飛砂に関しては十分議論されていない [1]．そこで本研究では飛砂における砂の連行係数の評価の手始めとして，飛砂の数値解析を行い，固体粒子の粒径が同程度の吹雪，浮遊砂との連行係数の比較を行った．

2. 数値解析モデル

数値解析モデルは固体粒子浮遊流の再現性が高い k－ε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. 飛砂と吹雪と浮遊砂

飛砂と吹雪と浮遊砂は共通項が多いが，違いも存在し，まとめると以下の 3 点が挙げられる．一つ目は周囲流体が飛砂，吹雪が空気，浮遊砂は水である点，二つ目は輸送される固体粒子が飛砂，浮遊砂は砂粒子，吹雪では雪粒子である点，三つ目は浮遊砂には水面が存在するが，飛砂，吹雪ではそのような境界は存在しない点である．

4. 数値モデルの検証

飛砂における実験データは久保田ら [2]によって観測された幅 1.0m，高さ 1.1m，長さ 20mの吹出型風洞を用い，風洞底部に厚さ 10cmの実験砂層を設けた砂粒子 0.15mm のデータを用いた．吹雪における実験データは福嶋ら [3]によって観測された幅 1.0m，高さ 1.0m，長さ 14m の風洞装置を用い，底面に 2.0cm の雪層を敷き詰め，上流より 0.17mm の雪粒子を供給したデータを用いた．浮遊砂における実験データは Vanoni [4]が行った精度の良い浮遊砂の実験として有名な水路長 12.192m，幅と深さともに 0.845m程度のスケールで行われた砂粒子が 0.16mm の浮遊砂の室内実験データを用いた．

Fig.1，2 にそれぞれの流速分布，流砂量分布の実験結果と解析結果を比較したものを示す．両分布ともに実験から得られた分布形との一致は良好である．風速分布は平板上の乱流境界層の特徴をよく表しているといえる．また，流砂量分布は底面から急激に減少しているがこれは周囲流体の密度に比べて，固体粒子の密度が大きいために現れる特徴である．

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において浮遊砂で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．Garcia[5]は砂の連行係数E_{sa}に関して，底面におけるせん断応力τ，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．

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

$A = 1.3 \cdot 10^{-7}$，$Z = R_p^{0.6}\, u_* / w_s$，$u_* = \sqrt{\tau / \rho_w}$ は底面での摩擦速度，ρ_wは水の密度である．

Keys Words：飛砂，浮遊砂，吹雪，乱流拡散方程式，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 都市システム工学科

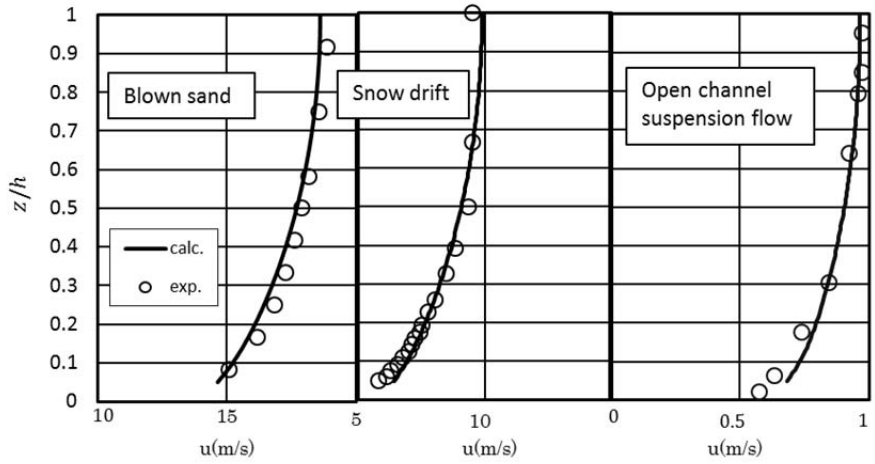

Fig.1 Distribution of velocity

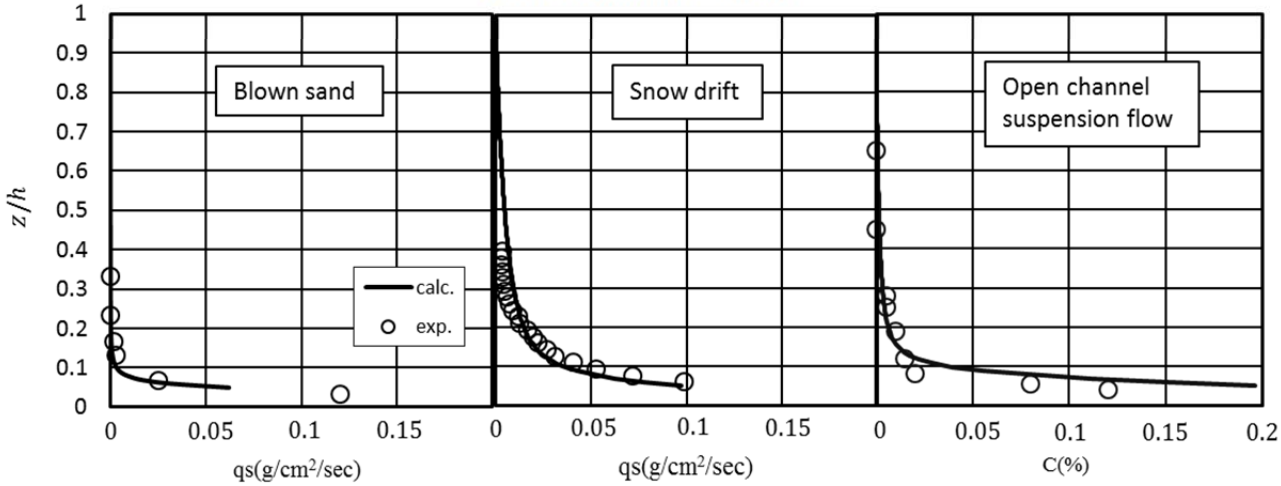

Fig.2 Distribution of solid particle flux

また, 吹雪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を用いることの有効性が報告されている．同様に飛砂に関しても連行係数は流れの特性量と固体粒子の特性量の関数となることが期待される．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 Fig.3 である. 飛砂の砂の連行係数も吹雪，浮遊砂と同様に Garcia の経験式に一致する傾向がみられる結果となったが，飛砂の連行係数は固体粒子の粒径が同程度でも 2 オーダーほど小さい結果となることもわかった.

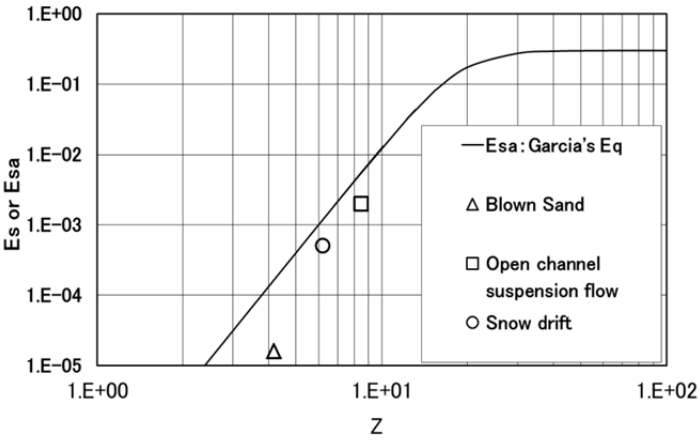

Fig.3 Entrainment coefficient

6. まとめ

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 の経験式と比較することによって，同程度の固体粒子の粒径を持つ飛砂，吹雪，浮遊砂の底面における濃度の境界条件についての相違を示した．今後は様々な粒径や現地スケールでのケースを増やし，連行係数の関数形を定める必要がある．

参考文献

1) 菊地ら：混相流，Vol.21，No.2，pp.177-184，2007
2) 久保田進ら:平成 18 年度土木学会海岸工学論文集, No.53，pp.431-435，2006
3) 福嶋ら:土木学会論文集, No.656/Ⅱ-52, pp.113-120, 2000
4) Vanoni,V.A.：Trans．of ASCE.，111，pp.67-102，1946
5) Garcia,M.：St. Anthony Falls Hydraulic Lab., Univ．of Minnesota, Project Report, 306, 179,1990