

# 砂輸送モデルと3次元数値波動水槽を用いた飛砂量計算手法の開発

## Development of method for calculating amount of wind-blown sand using Sand Transport Model and 3-D numerical wave tank

都市人間環境学専攻 関口 大樹  
Civil, Human and Environmental Engineering, Taiki SEKIGUCHI

**Key Words :** wind-blown sand, sediment transport, numerical simulation

### 1. はじめに

#### (1) 研究背景

海岸では平常時に砂の堆積・浸食や、漂砂や飛砂によって陸上や水中での砂の循環が行われている。日本の砂浜海岸では砂が風によって運ばれ飛砂として内陸へ運ばれることで、海岸線が後退する問題に直面している。新潟西海岸では突堤や潜堤、養浜等の対策を講じているにも関わらず、冬季特有の強風により飛砂として流出している。これまでも砂浜海岸での現地調査や、漂砂と飛砂それぞれの数値計算・実験での検討が行われてきた。一方で漂砂と飛砂を同時に計算できるような解析や、波による飛砂への影響を検討している例は少なく、数値計算による評価が求められている。

#### (2) 研究目的

Belly<sup>1)</sup>は水平床において飛砂の風洞実験を実施し、含水比の違いによる飛砂量の差異を示した。また、Faria et al.<sup>2)</sup>は砂に斜面をつけて風洞実験を実施し、斜面勾配が飛砂量に与える影響について評価した。そこで本研究では砂浜を模した実験を実施し、砂浜海岸における数値計算による飛砂量シミュレーションの精度向上と計算手法の確立を目的とする。

### 2. 研究手法

本研究では全長34 m、幅0.5 mの開水路を用いて水理模型実験を実施し、その結果を数値計算モデルでの数値計算結果と比較することで妥当性を検討した。

#### (1) 本検討における対象海岸について

本検討では新潟県新潟市に位置する新潟西海岸を対象地域と選定した。新潟西海岸では特に冬季の強風によって飛砂が多く発生するため飛砂対策工として堆砂垣が設けられており、片野<sup>3)</sup>によって現地観測および飛砂対策工の検討がなされている。本検討で用いた現地飛砂量は片野<sup>3)</sup>が実施した現地観測データより飛砂量式を用いて算出した。飛砂量式は既往研究によって複数提案されており、本検討では河村<sup>4)</sup>によって提案された式(1)に示す河村式を用いて飛砂量 $q$ を算出した。

$$q = K \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \quad (1)$$

ここで、 $\rho_a$  : 空気密度、 $g$  : 重力加速度、 $u_*$  : 摩擦速度、 $u_{*c}$  : 限界摩擦速度、 $K$  : 実験係数である。

#### (2) 数値解析モデルの概要

本研究では流体-構造-漂砂モデルであるCADMAS-STR-STMを用いて計算をおこなった。CADMAS-STR-STMは3次元数値波動水槽のCADMAS-SURF/3D-2F<sup>5)</sup>(以下CADMASとする)と構造解析のSTR3Dの連成モデルであるCADMAS-STRに砂輸送モデルのSTM(Sediment Transport Model)を連成させた数値モデルである。連成フロー図を図-1に示す。CADMAS-STRの基礎方程式は有川ら<sup>6)</sup>に詳しい。STMは高橋ら<sup>7)</sup>の理論に基づき、掃流砂層の連続式を式(2)、浮遊砂層の移流拡散方程式を式(3)に示す。また、気相と液相の掃流砂量をそれぞれ式(4)、式(5)に、掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂率を式(6)に示す。式(5)は河村式を基に導入した。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} + w_{ex} \right\} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (C_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial (M C_s)}{\partial x} + \frac{\partial (N C_s)}{\partial y} - w_{ex} = 0 \quad (3)$$

$$q_{Ba} = K \frac{\rho_a}{g \rho_s} (u_{*a} + u_{*ac})^2 (u_{*a} - u_{*ac}) \quad (4)$$

$$q_{Bw} = \beta \tau_*^{\frac{3}{2}} \sqrt{sgd^3} + e_s \left| \beta \tau_*^{\frac{3}{2}} \sqrt{sgd^3} \right| \tan \theta \quad (5)$$

$$w_{ex} = \alpha \tau_*^2 \sqrt{sgd} - w_s C \quad (6)$$

ここで、 $Z$  : 基準面からの底面高さ、 $t$  : 時間、 $\lambda$  : 砂粒の空隙率、 $q_{Bx}$ 、 $q_{By}$  :  $x$ 、 $y$ 方向の掃流砂量、 $w_{ex}$  : 掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂率、 $C_s$  : 平均浮遊砂濃度、 $h_s$  : 浮遊砂層厚、 $M$ 、 $N$  :  $x$ 、 $y$ 方向の流量フラックス、 $K$  : 実験係数、 $\rho_a$  : 気体密度、 $\rho_s$  : 土粒子密度、 $g$  : 重力加速度、 $u_{*a}$  : 気相の摩擦速度、 $u_{*ac}$  : 気相の限界摩擦速度、 $\alpha$ 、 $\beta$  : 粒度依存係数、 $\tau_*$  : シールズ数、 $s$  : 砂の水中比重、 $d$  : 土粒子の粒径、 $e_s$  : 勾配補正係数、 $\theta$  : 斜面角度、 $w_s$  : 土粒子の沈降速度、 $C$  : 掃流砂層と浮遊砂層の境界付近の濃度である。

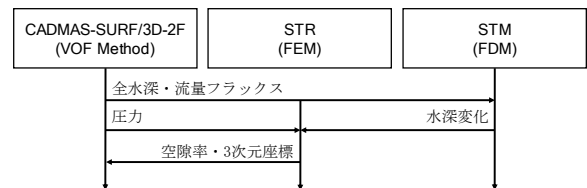


図-1 数値解析モデルの連成フロー図

### 3. 気相における飛砂について

#### (1) 模型実験

##### a) 実験条件

模型実験は全長34m、幅0.5mの開水路を用い、水平床の実験A、斜面地形において水を張り、送風のみを行った実験Bの2種類の実験を実施した。実験Aの実験断面図を図-2に、実験Bの実験断面図を図-3に示す。送風機はポータブル送排風機を用い、フレキシブルダクトを接続し実験断面内への送風を行った。本研究では中央粒径が約0.27 mmの珪砂を用い、飛砂量の計測は砂を実験地形最後部に箱を設置して捕捉し、実験終了後に電子ばかりで重量を計測した。実験時間は5分間とし、実験開始と同時に送風機を起動し、5分後の実験終了とともに送風機を停止した。実験Aは送風機を1台稼働させたケースと2台稼働させたケースの2ケースを実施し、実験Bは送風機を2台稼働させたケースのみ実施した。

風速計は熱線式風速計を用い、砂面から高さ10cmの位置に計測部を設置した。y方向の計測位置は平面での中心位置とし、計測位置は砂面最後部に計測した。得られた5分間の時系列風速データのうち、開始10秒後からの風速値データを平均した値を用いて対数則から導かれる式(7)より摩擦速度 $u_*$ を算出した。

$$u_* = \frac{u_z - u'}{5.75 \times \log_{10} \left( \frac{z}{z'} \right)} \quad (7)$$

ここで、 $u_z$  : 高さ $z$ [m]での風速値、 $u' = 8.94d$  : Focal Pointでの風速値[m/s]、 $z' = 10d$  : Focal Pointでの高さ[m]、 $d$  : 中央粒径[mm]である。

##### b) 飛砂量式・既往実験値との比較検討

実験結果を河村式および既往実験値と共にプロットした図を図-4に示す。横軸に摩擦速度、縦軸に単位幅単位秒当たりの飛砂量を示す。既往実験の論文名および河村式の実験係数 $K$ は凡例に示す。図-4より得られた実験値は既往実験値と同様の値を示した。また、それぞれの実験値から河村式の実験係数 $K$ を算出した。算出した実験ごとの実験係数 $K$ の平均値は実験Aが0.482、実験Bが0.538となり、式(1)に示す河村式から実験Aに比べて実験Bは飛砂量が増加する結果となった。

#### (2) 数値解析

##### a) 数値解析条件

計算断面は実験Aおよび実験Bの実験断面と同様とし、実験A、Bの数値解析ケースをそれぞれ計算A、Bとする。解析条件および物性値を表-1に示す。CADMASの格子サイズは5 cm、STRのメッシュサイズは10 cmとし、時間刻み幅はCADMASにおいてCFL条件から自動的に決定される機能を用いた。表-1内に示すX-面の流入境界に関し、CADMASでは任意波形を生成するための機能があり、

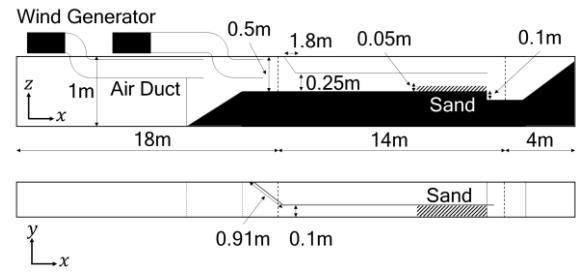


図-2 実験 A の実験断面図

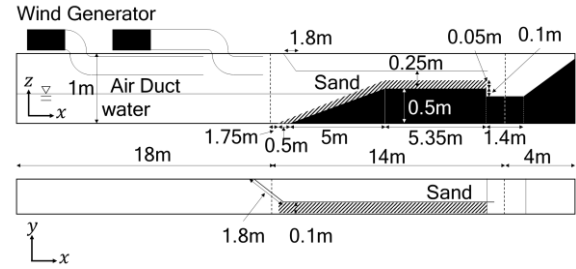


図-3 実験 B の実験断面図

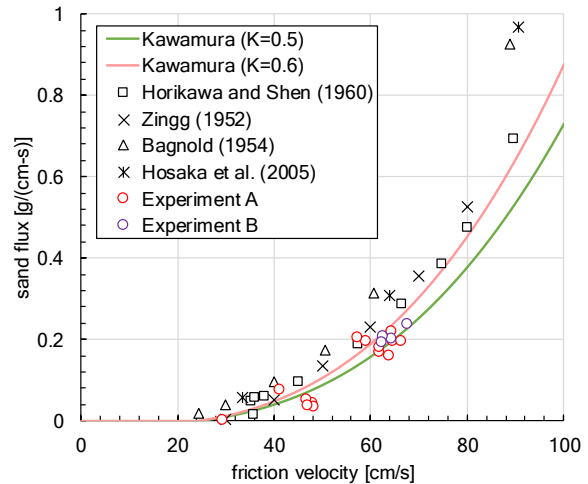


図-4 実験結果と河村式・既往実験値との比較

表-1 CADMAS における解析条件

| 境界条件        | X-面                               | 流入境界 |
|-------------|-----------------------------------|------|
|             | X+面                               | Free |
|             | Y-面, Y+面, Z-面                     | Slip |
|             | Z+面 (x=0~12.6m)                   | Slip |
|             | Z-面 (x=12.6~14 m)                 | Free |
| ヤング率        | $1.67 \times 10^8 \text{ N/m}$    |      |
| ポアソン比       | 0.333                             |      |
| 空気の体積弾性係数   | $1.40 \times 10^5 \text{ Pa}$     |      |
| 土粒子密度       | $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ |      |
| 気体密度        | $1.00 \text{ kg/m}^3$             |      |
| 粒径          | 0.275 mm                          |      |
| 係数 $K$      | 0.500                             |      |
| 係数 $\alpha$ | $3.73 \times 10^5$                |      |
| 係数 $\beta$  | 3.95                              |      |
| 沈降速度        | 1.31 m/s                          |      |
| 限界摩擦速度      | 0.237 m/s                         |      |
| 空中比重        | $2.65 \times 10^3$                |      |

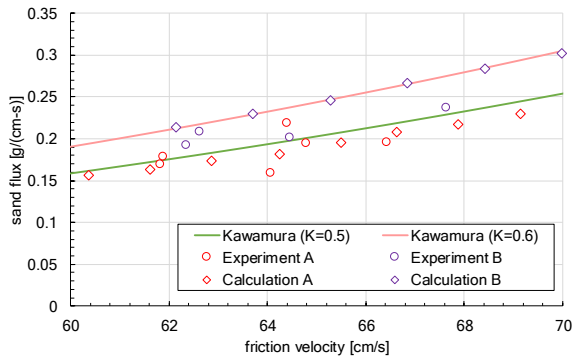


図-5 実験結果と数値解析結果，河村式の比較

表-2 実験Cの造波パラメータおよびC値

|         | 波高 [cm] | 周期 [s] | C値    |
|---------|---------|--------|-------|
| Case C1 | 2.0     | 5.0    | 0.789 |
| Case C2 | 1.0     | 5.0    | 0.394 |
| Case C3 |         | 10     | 0.250 |
| Case C4 | 0.75    | 5.0    | 0.296 |
| Case C5 |         | 10     | 0.187 |
| Case C6 | 0.50    | 5.0    | 0.197 |
| Case C7 |         | 10     | 0.125 |

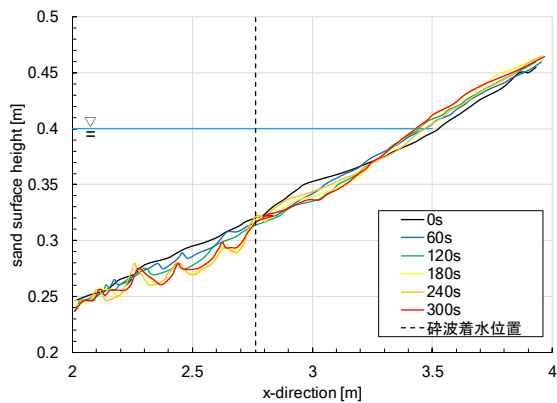


図-6 岸沖方向の砂面高さ

改良を行い，気相にも同様の機能を付加した．本検討における流入境界から与える流入風速は模型実験と同様の増加率となるように設定した．流入風速値は2.5 m/sから10 m/sまで23ケース実施した．実験値より算出した河村式の実験係数から数値解析においては0.5を用いた．

#### b) 実験値と数値解析結果の比較検討

得られた数値解析結果を実験結果と河村式と共に示した図を図-5に示す．飛砂量は実験と同様に砂面最後部からの巻き上げ量を解析時間および奥行幅で割り，摩擦速度は実験での計測箇所と同じ位置における摩擦速度を用いた．

計算Aの解析結果は実験Aの実験結果および実験係数  $K = 0.5$  を用いた河村式と同様の値を示した．一方，計算Bの解析結果は実験Bの実験結果よりも過大評価となり，実験係数  $K = 0.6$  を用いた河村式と一致した．数値

解析によって斜面の影響で飛砂量が増加することは確認できたが，再現性については係数や斜面勾配を考慮し検討していく必要がある．

#### c) 現地観測データとの比較検討

実施した実験結果および解析結果を用いて片野ら<sup>3)</sup>が実施した現地観測データとの比較検討を実施した．飛砂量観測データは観測前後の地形測量より算出し，風速データは風向を考慮して岸沖方向の飛砂量として比較した．片野ら<sup>3)</sup>は現地観測データから導かれる河村式の実験係数  $K$  は0.83や0.9の値をとるとしており，本検討で実施した数値解析の結果はそれよりも小さい値を示している．このことから現地では風だけではなく波の作用によっても飛砂に影響を与えていると考え，波を作用させた実験を実施した．

### 4. 気液相における飛砂について

#### (1) 海浜変形について

堀川ら<sup>8)</sup>より，砂浜海岸は海浜変形において沖波波高  $H_0$ ，沖波波長  $L_0$ ，海浜勾配  $\tan \beta$ ，中央粒径  $d_{50}$  によって求められる式(8)に示すC値により堆積海岸，浸食海岸とその中間の3種類に分類される．

$$C = (H_0/L_0)(\tan \beta)^{0.27}(d_{50}/L_0)^{-0.67} \quad (8)$$

C値が8以上でbar型と呼ばれる浸食海岸型(タイプI)，C値が4以下でberm型と呼ばれる堆積海岸型(タイプIII)，C値が4より大きく8未満の場合はその中間型(タイプII)に分類される．

#### (2) 水理模型実験

実験地形は実験Bと同様とし，送風に加えて全長34 mの開水路の左端部に設置されたピストン型造波板を用いて造波を行った．本ケースを実験Cとする．実験時間は実験Bと同様に5分間とし，実験開始と同時に送風機および造波板を起動し，実験終了とともに送風機・造波板を停止した．実験Cの造波パラメータおよびそれぞれのC値を表-2に示す．本研究では造波パラメータの波高および周期から波長を求め，C値を算出した．飛砂量の増加については波による砂の堆積の影響が大きいと考えたことから，造波パラメータおよびC値から堆積型となるように設定した．

#### (3) 実験結果

実験Cのうち，Case C1の60秒ごとの砂面高さをプロットした図を図-6に示す．図中に示す碎波着水位置は実験時間中に造波した波のうち，碎波が生じた60波の平均位置である．図-6より碎波点付近で砂漣が，遡上域で堆積が生じており，設定したC値の通り堆積型となったことが確認された．

また，実験結果を河村式および既往実験値と重ねてプロットした図を図-7に示す．図-7より実験Cの飛砂量

は実験Aおよび実験Bの結果よりも大きくなった。実験A, Bの値は実験係数 $K = 0.5$ を、実験Cの値は実験係数 $K = 0.6$ を用いた河村式が最も実験値を再現していた。さらに、それぞれの実験値から算出した河村式の実験係数 $K$ は実験Aが0.482, 実験Bは0.538であったが、実験Cについても同様に算出すると0.617となった。これらの結果より堆積するような波の作用により飛砂量が増加することが示された。

## 5. 考察

### (1) 飛砂量式について

いままでに飛砂量式として多くの式が提案されているが、すべて式(9)の示される形で表すことができる。

$$q = A \frac{\rho_a}{g} u_*^B + E(u_*) \quad (9)$$

ここで、 $A$ および $B$ は定数、 $E$ は $u_*$ の関数である。河村式は右辺第2項を含む形となっているが、どの飛砂量式にも定数が含まれており、その定数の値によって飛砂量が大きく変化する。河村式における実験係数 $K$ について河村<sup>4)</sup>は3.1, 片野ら<sup>3)</sup>は0.83や0.9をとるとしており、値の幅が広く、飛砂量の算出において実験係数 $K$ が結果を大きく左右することとなる。本研究では水平床の場合は約0.5, 斜面や波の作用がある場合についてはおよそ0.6といった結果となった。これは既往の実験値と同様の値となったが、現地調査結果とは異なる結果となった。今後海浜勾配や造波パラメータを変えた水理模型実験を行うことで、地形の影響から適切な係数の提案ができるようになると考える。

### (2) 波の作用が飛砂量に与える影響について

本研究における模型実験から実験A, B, Cの河村式の実験係数 $K$ はそれぞれ0.482, 0.538, 0.617となり、徐々に値が大きくなった。これは実験Aに比べて実験Bは斜面の影響により増加し、実験Bに比べて実験Cは波の作用の影響により増加したことを示している。これより砂浜海岸では風だけでなく波の作用によって飛砂量算定の精度が向上することが示唆された。今後は数値解析

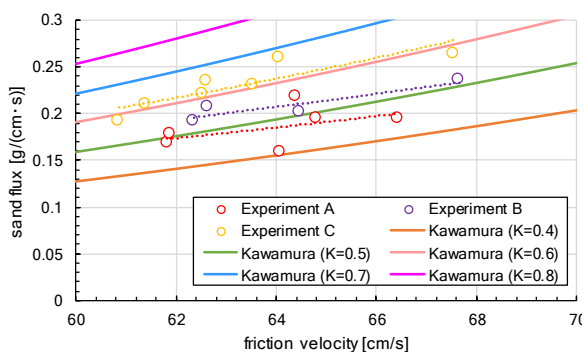


図-7 実験結果と河村式との比較

による再現が求められるが、波によって巻き上げられた砂は掃流砂層だけでなく浮遊砂層にも砂が存在する。そのため、数値解析には汀線付近の砂移動のメカニズムについて検討し、適用する必要がある。また、各パラメータや係数についても感度分析や模型実験から適切な値を検討することが必要である。

## 6. おわりに

主要な結論を以下に示す。

- (1) 水平床および斜面地形で模型実験を行い、斜面の影響において飛砂量が増加することを示した。
- (2) 砂輸送モデルと3次元数値波動水槽を用いた数値解析を行い、得られた結果は実験値や既往飛砂量式を再現していた。
- (3) 送風に加え造波を行った水理模型実験を実施し、波の作用によって飛砂量が増加することを示した。

また、今後の課題としてパラメータを変えた実験や、汀線付近の砂移動のメカニズムをモデル化した数値解析を行うことが必要である。

**謝辞:**新潟西海岸の現地観測データについて株式会社エコー、片野明良氏から提供いただいた。記して感謝の意を表す次第である。

### 参考文献

- 1) Belly, P. Y.: Sand movement by wind, *USACE Technical Memorandum 01*, 1964.
- 2) Faria, R., Ferreira, A. D., Sismeiro, J. L., Mendes, J. C. F. and Sousa, A. C. M.: Wind tunnel and computational study of the stoss slope effect on the aeolian erosion of transverse sand dunes, *Aeolian Research*, Vol 3, Issue 3, pp.303-314, 2011.
- 3) 片野明良, 林寛之, 千田奈津子, 加辺圭太郎: 堆砂垣周辺の平面的な飛砂堆積特性と飛砂量推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 77 巻, 第 2 号, pp.I\_439-I\_444, 2021.
- 4) 河村龍馬: 飛砂の研究, 東京大學理工學研究所報告, 5, pp.95-112, 1951.
- 5) 有川太郎, 山野貴司: スパイクノイズ処理を有する数値波動水槽による衝撃砕波圧の計算, 港湾空港技術研究所報告書, No. 1175, 2009.
- 6) 有川太郎, 浜口一博, 北川和士, 鈴木智憲: 数値波動水槽と構造物変形計算との連成計算手法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 65 巻, 第 1 号, pp.860-870, 2009.
- 7) 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, 浅井大輔: 掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波土砂移動モデルの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 46 巻, pp.606-610, 1999.
- 8) 堀川清司, 砂村継夫, 近藤浩右: 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, 第 21 巻, pp.193-199, 1974.