

唐津市大島地区の貯砂場における飛砂防止対策工の検討

A Study of Control Wind-Blown Sand from the Stock Yard in Ohshima District, Karatsu City

池畑義人¹・西井康浩²・松原千恵³・松永信博⁴

Yoshito IKEHATA, Yashiro NISII, Chie MATSUBARA and Nobuhiro MATSUNAGA

The residents in Ohshima district, Karatsu city are being afflicted with the blown sand generated from stock yard. The purpose of this study is to propose new countermeasures to decrease blown sand through the wind tunnel experiments and the numerical simulations. The experiments revealed that the upward extension of the present shield fence is most effective to decrease the flux of blown sand. The height of the most effective fence was decided by using the numerical simulations. As a result, it is shown that the 20m shield fence is the most effective in Ohshima district.

1. はじめに

近年、海砂採取は規制が強化される傾向にあるものの、コンクリート骨材用途を始めとして、その需要は依然として高い。図-1に示される佐賀県唐津市大島地区には、ガット船から陸揚げされた海砂がダンプトラックで搬出されるまでの間、岸壁で砂山状に積み上げられる貯砂場が設置されている。貯砂場の周囲は住宅地に囲まれているため、強風時に貯砂場内の砂山から砂が巻き上げられ、周囲の住宅地に飛砂被害をもたらしている。

今までの飛砂に関する研究は、主として砂浜海岸や砂丘から風によって内陸部へ輸送される飛砂問題に関するものであった。(有働(2009), Junaidiら(2010))しかしながら、貯砂場からの飛砂も新たな生活環境をおびやかす社会問題となっている。唐津市大島地区の貯砂場の周囲には、高さ11mの防砂壁が設置されているものの、住宅密集地は、その南から東にかけて形成されているため、冬季の北西季節風で発生する飛砂が深刻な問題となっている。貯砂場から発生する飛砂を防止する方策として、①防砂壁(フェンス)の設置、②防砂林の植林、③砂山の湿潤化、などが挙げられる。この中で、防砂林は植林後に樹木が成長するまでの間の対策が困難である。散水による砂山の湿潤化には、砂の上にスプリンクラーを設置する必要がある。このスプリンクラーは、砂を上から落として砂山を形成するのに邪魔になるため、荷役作業の効率を低下させる。このため、砂山の湿潤化は海砂販売業者の理解を得ることが難しい。

本研究では貯砂場の砂山から発生する飛砂について、

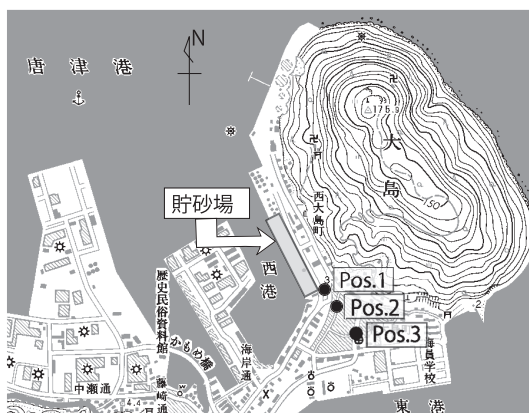


図-1 唐津市大島地区の概要

コストと施工性を加味しつつ、最も飛砂防止効果が大きい対策工について検討し、その効果を風洞水槽実験および数値シミュレーションで検証した。

2. 風洞水槽実験

(1) 実験概要

実験には図-2に示す風洞水槽を使用した。十分な風速を確保するために風洞水槽の床を0.25m高上げし、そこに円錐形の砂山を設置した。砂山の背後には現地と同じ遮蔽率を持つフェンス模型を設置した。実験に用いた砂は、現地の貯砂場で取り扱われている砂の中で、最も粒子の小さいもので、中央粒径は $D_{50}=0.1\text{mm}$ であった。現地スケールに対するテストセクション内の模型のスケール比は1/62.5に設定された。図-1のP1,P2,P3は、現地の聞き取り調査結果から顕著な飛砂被害が発生していた地点であり、実験では図-2のPos.1, Pos.2, Pos.3がそれぞれ対応している。この3点に図-3に示すような補砂器を置き、そのネット内に溜まった砂の重量を計測することによって飛砂フラックスを測定した。断面平均風速は、

1 正会員	博(理)	日本文理大学准教授工学部建築学科
2 正会員	博(工)	株式会社三洋コンサルタント調査部次長
3		株式会社三洋コンサルタント調査部
4 フェロー	工博	九州大学教授大学院総合理工学研究院 流体環境理工学部門

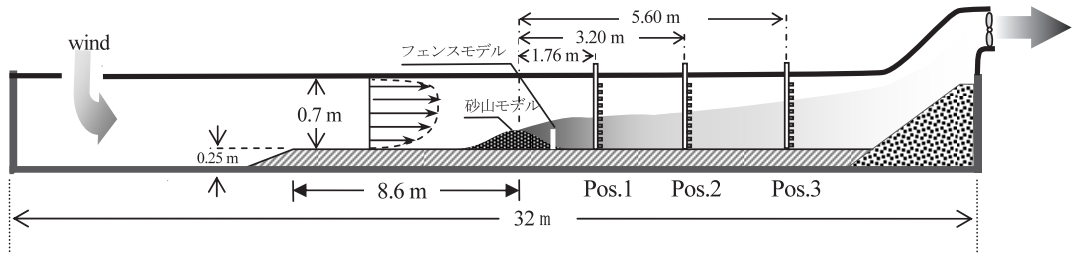


図-2 風洞水槽装置の模式図 (1/62.5:模型実験)

表-1 実験条件と飛砂の減少率 (単位: cm)

Case		0	1	2	3	4	5	6	7	8
実験条件	フェンス高さ	18								23
	フェンス形状	直立				庇 (1cm)	庇 (3cm)	庇 (5cm)	粗度板	直立
	砂山高さ	11.2	16	9	6	11.2				
結果	Pos.1	1	33	0.80	0.07	5.14	1.55	1.0	9.3	1.1
	Pos.2	1	8.3	0.17	0.05	1.58	0.57	0.29	1.8	0.19
	Pos.3	1	5.0	0.11	0.04	1.12	0.42	0.22	1.2	0.15

(基準: フェンス高さ 18cm, 砂山高さ 11.2cm)

全ての実験で 8.54m/s に固定されている。

(2) 実験条件および結果

フェンス模型には、現地のフェンスと遮蔽率が等しくなるように直径 4.2mm の孔が 5mm 間隔で格子状に穿けられた。このフェンス模型に対して、現況の貯砂場を再現したのが Case0、Case0 と同じフェンスの高さおよび形状で砂山の高さを変化させる条件が Case1～3、Case0 と同じ砂山の高さで、フェンスの上端に風上方向に延びる庇状の板を取り付けた条件が Case4～6、フェンスの風上方向の壁面に長さ 1cm の粗度板を一樣に取り付けた条件が Case7、フェンスの高さを延長した条件が Case8 である。以上の実験条件と飛砂フラックスの測定結果をまとめたものを表-1 に示す。表-1 の『結果』の項目は、Pos.1～3 における単位幅あたりの飛砂フラックスで、Case0 (現況) における測定値に対する割合が記されている。色つきのセルは、Case0 と比較して飛砂フラックスが 20% 以下に低減した結果を示している。

以上の結果から、飛砂フラックスの低減にはフェンスに構造物を取り付けるよりも、砂山を低くする、あるいはフェンスを高さ方向に延長することが効果的であることがわかった。

3. 風洞水槽シミュレーション

水槽実験の結果から、砂山の高さに対して十分な高さのフェンスを建設することが飛砂フラックス低減に有効

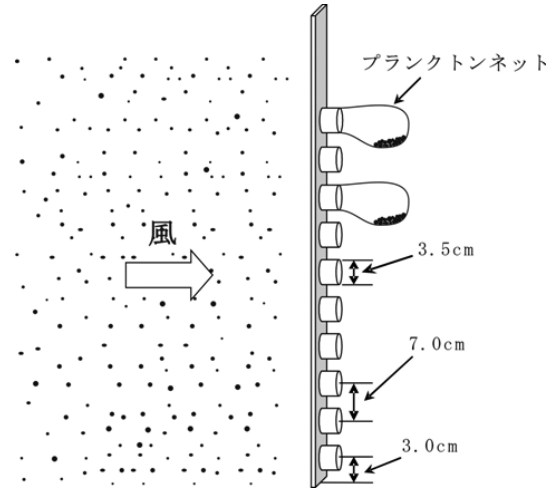


図-3 実験に用いた捕砂器の模式図

であることが確認できた。しかし、飛砂低減効果に優れ、かつ経済性、施工性の両立が期待できる最適なフェンスの高さを求めるために数値シミュレーションが必要となる。ここでは、飛砂輸送シミュレーションモデルを作成し、風洞水槽実験の結果を再現することで、その精度を検証した。

(1) 基礎方程式系

基礎方程式は、仲座ら (1993) が提案した海塩粒子の輸送モデルを参考に構築した。基礎方程式には、以下に示すような鉛直 2 次元断面における流れ関数-渦度方程式、連続の式および飛砂濃度の輸送方程式を用いた。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} = \left(\frac{1}{Re} + \nu_e \right) \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \cdots (1)$$

$$\omega = - \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \psi \cdots (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial y} - V_0 \frac{\partial C}{\partial y} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \cdots (3)$$

ここで、 ω は渦度、 ψ は流れ関数、 C は飛砂濃度、 V_0 は砂粒子の沈降速度、 ν_e は渦動粘性係数、 K は渦動拡散係数である。 x 軸は風洞の流下方向、 y 軸は鉛直上向きにとられている。これらの方程式は、フェンスの高さ H と流入

風速 U で無次元化されており, レイノルズ数 Re は

$$Re = \frac{UH}{\nu} \quad \dots\dots\dots (4)$$

と定義できる. ここで ν は空気分子動粘性係数である. 渦動粘性係数 ν_e と渦動拡散係数 K は, プラントルの混合距離理論から, 混合距離を κy , 代表流速 u_* として,

$$\nu_e = K = \kappa u_* y \quad \dots\dots\dots (5)$$

と決められた. ここで, κ はカルマン定数 (0.4) である. 粒子の沈降速度 V_0 は, 実験に使用した砂のうちで最も多

く含まれていた粒径 0.1mm とそれに次いで含まれていた 0.2mm, 0.3mm の砂の降下速度をストークスの沈降式から求めたものを使用した.

(2) 方程式の差分化

これらの基礎方程式は, 図-4 に示されるような高さ方向 65 個, 流下方向 300 個の直交格子上で差分化された. 格子は鉛直方向には等間隔, 流下方向にはフェンス近傍に格子が集中する不等間隔格子を用いた. 差分化には対流項に 3 次精度風上差分, 粘性項に 2 次精度中心差分を用いた. 時間方向の積分近似にはクランク-ニコルソン法を用いている.

(3) 境界条件

流れの境界条件は, 流入端で一様流の流入, 底面で粘着の条件, 上端は渦度の発生なしとして, 以下のように定義した.

$$\text{流入境界: } \psi = y, \quad \omega = 0, \quad C = 0$$

$$\text{底面: } \psi = 0, \quad \omega = \frac{2(\psi_{i+1} - \psi_i)}{\Delta x^2}, \quad \frac{\partial C}{\partial y} = 0$$

$$\text{上端: } \psi = y_{top}, \quad \omega = 0, \quad C = 0$$

$$\text{流出端: } \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

フェンス壁面上の格子点 (i, j) では, 風と飛砂が遮蔽率 a_i をもって通り抜ける条件を与えている. つまり,

Run	1-1	1-2	1-3
粒子沈降速度 (V_0) (相当する砂粒子の径)	2.0×10^{-3} (0.1mm)	4.0×10^{-3} (0.2mm)	6.0×10^{-3} (0.3mm)
フェンス高さ (H)	1.0		
フェンス遮蔽率 (a_i)	0.667		
砂山高さ	0.835		
格子数	300×65		
Δx	0.00722~0.145		
Δy	0.06		
計算領域サイズ	90×3.9		
Δt	2.0×10^{-4}		
計算繰返回数 (N)	5.0×10^6 回		
総計算時間 ($N \cdot \Delta t$)	1000		
Re	1.18×10^6		
渦動粘性係数 (ν_e) 渦動拡散係数 (K)	0.001y		

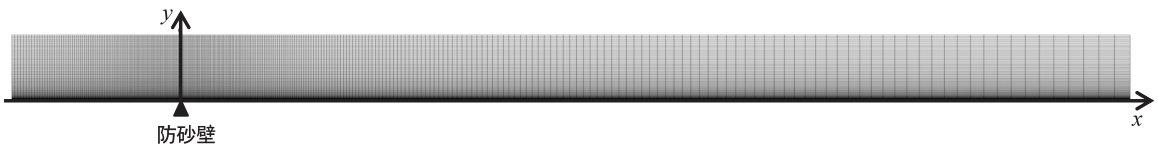


図-4 計算格子

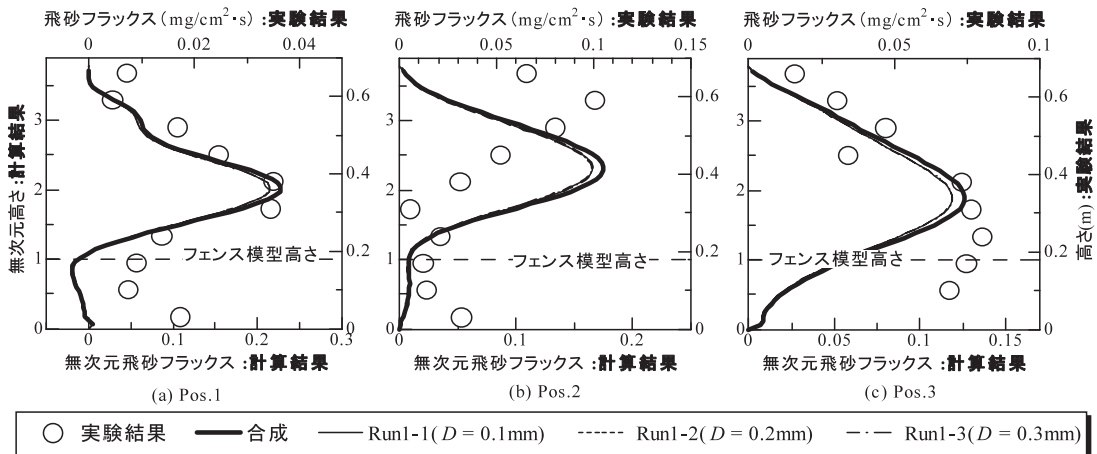


図-5 風洞水槽実験と数値計算から得られた飛砂フラックスの鉛直分布

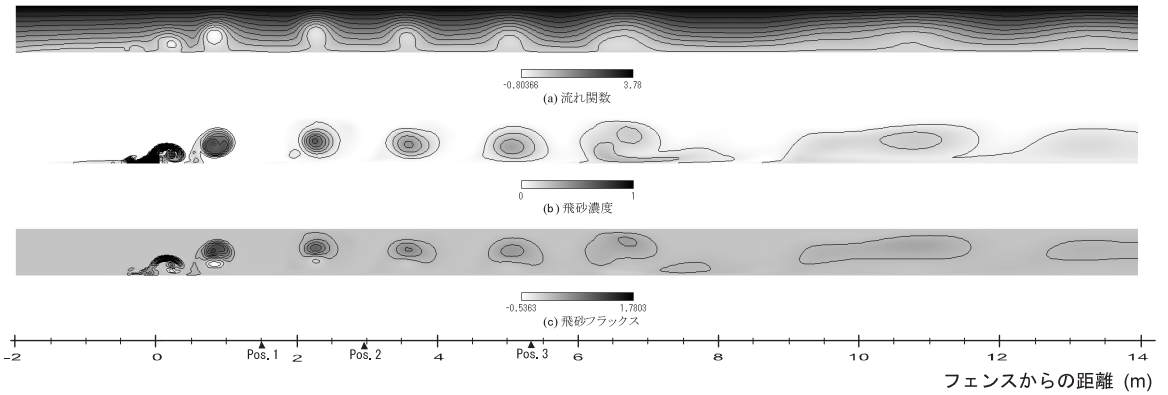


図-6 風洞水槽シミュレーションにおける飛砂のフローパターン

$$\psi_{i+1,j} = (1 - a_t)\psi_{i,j}$$

$$C_{i+1,j} = (1 - a_t)C_{i,j}$$

$$\omega_{i+1,j} = \frac{2(\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j})}{\Delta x^2} = -\frac{2a_t}{\Delta x^2}\psi_{i,j}$$

(4) 計算条件

風洞水槽実験のCase0にあたる飛砂を再現するため、表-2に示すような計算条件を設定した。砂山の高さはフェンス高さの0.835倍の高さとし、この高さを持つ山形（三角形）の内部の格子点で $C=1$ の濃度を与えた。この計算条件は、風洞水槽実験におけるCase0の実験条件に対応している。

(5) 計算結果

Pos.1～3における風洞水槽実験と数値計算から得られた飛砂フラックスの鉛直分布を図-5に示す。ここで、『合成』とは、実験砂の粒度分布に応じて、3つの沈降速度による結果を重みづけ平均したものである。図-5から計算結果と実験結果の分布形状は比較的良好に似ており、計算結果がほぼ妥当であることが示唆される。また、粒径の違いによるフラックスの鉛直プロファイル形状に差

異はあまり見られない。

図-6に計算から得られたフローパターンを示す。図-6(a)は流れ関数、(b)は飛砂濃度、(c)は飛砂フラックスの等値線図である。この図から、フェンスの背後で周期的に渦が放出され、下流に輸送されるにつれ、その渦が減衰していく様子が再現されている。

4. 現地シミュレーション

風洞水槽シミュレーションの結果から、数値計算によって砂山から発生する飛砂フラックスの動態を再現することがわかった。ここでは、飛砂防止性能と経済、施工性を兼ね備えた最適なフェンス高さを検討するために、この計算コードを唐津市大島地区における飛砂に適用した。

(1) 計算条件

表-3は現地シミュレーションの計算条件である。計算領域の高さは上端境界の影響を受けないように風洞水槽シミュレーションの3倍をとった。流入風速 (U) は、アメダス唐津観測所における過去10年間の風速データ

表-3 現地シミュレーション計算条件（カッコ内は実次元スケール）

Run	2-0	2-1	2-2	2-3	2-4
防砂壁高 (H)	1.0 (11m)	1.0 (15m)	1.0 (18m)	1.0 (20m)	1.0 (25m)
流入風速 (U)	1.0 (15m/s)				
砂山高さ	0.89 (10m)	0.67 (10m)	0.56 (10m)	0.50 (10m)	0.40 (10m)
沈降速度 (V_0)	4.0×10^{-5} (2.0×10^{-6} m/s)				
格子数	300 × 200				
Δx	0.0072 ~ 0.15 (0.081m ~ 1.6m)	0.0072 ~ 0.15 (0.11m ~ 2.2m)	0.0072 ~ 0.15 (0.12m ~ 2.6m)	0.0072 ~ 0.15 (0.14m ~ 2.9m)	0.0072 ~ 0.15 (0.18m ~ 3.6m)
Δy	0.06 (0.672m)	0.06 (0.90m)	0.06 (1.08m)	0.06 (1.20m)	0.06 (1.50m)
計算領域サイズ	90 × 12 (1008m ~ 134m)	90 × 12 (1350m ~ 180m)	90 × 12 (1620m ~ 216m)	90 × 12 (1800m ~ 240m)	90 × 12 (2250m ~ 300m)
時間刻み (Δt)	2.0×10^{-4} (1.47×10^{-4} 秒)	2.0×10^{-4} (2.00×10^{-4} 秒)	2.0×10^{-4} (2.40×10^{-4} 秒)	2.0×10^{-4} (2.67×10^{-4} 秒)	2.0×10^{-4} (3.33×10^{-4} 秒)
計算繰返回数 (N)	5.0×10^6 回				
総計算時間 ($N \cdot \Delta t$)	1000 (733 秒)	1000 (1000 秒)	1000 (1200 秒)	1000 (1333 秒)	1000 (1667 秒)
レイノルズ数 (Re)	1.29×10^7	1.73×10^7	2.08×10^7	2.31×10^7	2.88×10^7
渦動粘性係数 (ν_v)	0.0010y	0.0010y	0.0010y	0.0010y	0.0010y
渦動拡散係数 (K)					

表-4 高度5mにおける飛砂フラックスの減少率

Run x (m)	2-0 (11m)	2-1 (15m)	2-2 (18m)	2-3 (20m)	2-4 (25m)
94.0 (Pos.1)	1.0	0.16	0.38	0.21	0.0
184 (Pos.2)	1.0	0.13	0.17	0.091	0.055
250	1.0	0.68	0.19	0.056	0.13
333 (Pos.3)	1.0	0.51	0.64	0.41	0.57
500	1.0	0.29	0.25	0.12	0.15
1000	1.0	0.57	0.54	0.37	0.20

(基準：フェンス高さ11m)

図-5 高度5mにおける飛砂フラックスの減少率

Run x (m)	11m (Run2-0)	20m (Run2-3)	20m	
	樹木無し		樹木遮蔽率 25%	樹木遮蔽率 50%
94.0 (Pos.1)	1.0	0.21	0.41	0.376
184 (Pos.2)	1.0	0.091	0.0	0.0
250	1.0	0.056	0.0	0.0
333 (Pos.3)	1.0	0.41	0.008	0.012
500	1.0	0.12	0.183	0.13
1000	1.0	0.37	0.310	0.30

(基準：フェンス高さ11m, 樹木無し)

で、飛砂の発生させる3風向(W,WNW,NW)の中から最大のものを選んだ。

貯砂場の砂山の高さは10mに固定して、現在と同様のフェンスの場合(Run2-0)、および現況からフェンス高を延長した場合(Run2-1～Run2-4)のシミュレーションを行った。

(2) 計算結果

表-4に、高度5mにおける現況(Run2-0)に対する飛砂フラックスの低減率を示す。色つきのセルは、飛砂フラックスが現況に比べて20%以下に低減したことを示す。この結果から、フェンス高は25mの場合(Run2-4)が最も飛砂低減効果が高いが、フェンス高が20mの場合(Run2-3)でも、飛砂フラックスは十分減少している。特にPos.1～Pos.3の間の住宅密集地において、Run2-3($H=20m$)における飛砂フラックス低減率はRun2-2($H=18m$)よりも大きく低減する一方、Run2-5($H=25m$)との差はあまり認められない。このことから、大島地区における貯砂場のフェンス高さを現在の高さ11.2mから約9m延長すれば、飛砂量は大部分の場所で現在の20%程度に抑えられ、それ以上にフェンス高を延長しても飛砂量は、ほとんど低下しないことが予想される。

(3) 樹木を考慮した計算

大島地区の飛砂防止には、フェンス高20mの条件(Run2-3)を最適であることがわかったので、更なる飛砂低減効果のために、防砂林を植林した場合の計算も実施した。高さ15m、遮蔽率25%および50%の透過壁を樹木とみなして、フェンスから139m離れた位置に設置した。樹木以外の計算条件はRun2-3と同様である。表-5に、高度5mにおける現況(Run2-0)に対する飛砂フラックスの低減率を示す。フェンス近傍では樹木なしの場合よりも飛砂フラックスは大きい、Pos.2より離れた場所では飛砂フラックスが大きく減少していることがわかる。

5. おわりに

貯砂場から発生する飛砂が生活環境に大きな影響を及ぼしている唐津市大島地区において、最適飛砂防止工

を提案するために風洞水槽実験と風洞水槽および現地シミュレーションを実施した。この結果から、以下のことがわかった。

- ①フェンス形状に対する飛砂低減効果について、フェンスの先端を折り曲げたり、フェンス壁面の粗度を増大させたりする場合には、飛砂量の低減効果はあまり認められなかった。一方、フェンス高さの延長および砂山高さの低減は飛砂量低減に効果が認められた。
- ②2次元の簡便なモデルによって風洞水槽実験をシミュレートしたところ、飛砂フラックスの鉛直分布を再現することができた。
- ③現地の飛砂輸送を数値モデルによって計算したところ、唐津市大島地区の貯砂場において、飛砂防止性能と経済性、施工性を考慮すると、最適なフェンス高さは20mであることが予測された。
- ④フェンス高の延長に加えて、防砂林の設置も飛砂量の低減に大きな効果があることが確認できた。

謝辞：本研究の遂行にあたって、佐賀県唐津土木事務所の担当者に多大なご協力をいただきました。また、風洞水槽実験の実施にあたっては、九州大学大学院の久田由紀子氏、小嶋啓太氏、日本文理大学建設都市工学科の学生諸君に協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 有働恵子(2009)：現地海岸における飛砂量の高頻度観測，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.B2-65，No.1，2009，546-550
- 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄(1993)：飛塩(海塩粒子)拡散の数値流体力学的解析，海岸工学論文集，40巻，pp1036-1040
- Junaidi・青木伸一・加藤 茂・片岡三枝子・若江直人・尼崎貴大(2010)：中田島砂丘における飛砂の特性と短期的地形変化に関する研究，土木学会論文集B2 (海岸工学) Vol.B2-65，No.1，2009，621-625