

植生領域の飛砂に関する実験的研究

有働 恵子*・武 若 聡**・西村 仁嗣***

日本の砂浜で広く見られるコウボウムギを擬似した植生モデルを用いて風洞実験を行い、植生形態が飛砂に及ぼす影響を調べた。植生モデルとして、固定された棒型ならびにコウボウムギ型モデルと柔軟性のあるコウボウムギ型モデルを用い、植生層を作成した。植生層内外の平均風速分布、風を 60 秒間作用させたときの砂面高変化および砂粒子のサルテーション軌道を解析した。コウボウムギ型植生層では、棒型の場合と比較して植生層内の風速の減衰が大きく、植生領域風下側での堆砂が顕著であった。柔軟性のある植生層では風下側のサルテーションの水平速度が小さくなっていた。植生形状の差異および可動性の有無は飛砂現象に顕著な違いをもたらした。

1. はじめに

海岸植生に飛砂を捕捉・抑制する効果があることはこれまでにも報告されており、例えば有働・武若 (2001) は地形変化と植生の関係を調べるために現地調査を行っているが、その素過程については不明な点が多い。辻本・西澤 (1999) は、植生のモデルとして固定された棒状の抵抗を用いて実験を行っているが、変形を許容しないモデルでは、実現象との対比に限界があると思われる。本研究では、日本の砂浜で広く見られるコウボウムギを擬似した柔軟性のある植生モデルを用いて風洞実験を行い、植生形態が飛砂現象に及ぼす影響を調べる。

2. 実験装置

2.1 風洞の概要

実験に用いた風洞は吹出型で、測定部の寸法は断面 $0.35\text{ m} \times 0.35\text{ m}$ 、流下方向長さ 2.3 m である。測定部底面に、東北珪砂 6 号 (平均粒径 0.23 mm) を 10 mm の厚さで敷き詰めた。測定部最上流断面中心における平均風速を流入風速 U と定義し、実験では測定部内に植生モデルを設置しないときの流入風速 U_0 が $5.95, 6.98, 7.90$ および 8.82 m/s となるようにファンの回転数を変化させた。

2.2 植 生 層

植生層を構成する植生モデルの形状および配置方法等を表一に示す。コウボウムギを擬似したモデルは、厚さ 0.1 mm の PET フィルムを用いて作成した。葉は長さ 150 mm 、幅 8 mm の笹型で、内側 4 枚、外側 4 枚を 2 重にして 1 株とした。このモデルの砂面上高さは $50 \sim 70\text{ mm}$ である (写真一)。また、比較のために、変形しない棒型モデルとコウボウムギ型モデルを作成した。棒型モデルは直径 6 mm のストローを用いて作成した。コウボウムギ型モデルは、厚さ 0.75 mm の塩化ビニル板を用い

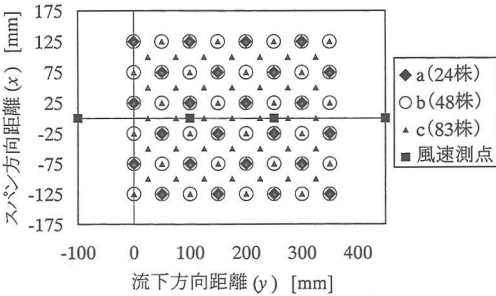
表一 植生層の諸元

植生モデルの形状	変形	植生の配置	C_v	U	軌道
I モデルなし			0.0	5.95	○
II 棒型	×	a (24 株, 千鳥)	0.57	5.79	○
		b (48 株, 格子)	1.13	5.76	×
		c (83 株, 千鳥)	2.26	5.62	○
III コウボウムギ型	×	a (24 株, 千鳥)	1.08	5.62	○
	○	a (24 株, 千鳥)	0.54	5.67	○
		b (48 株, 格子)	1.09	5.35	×

変形: 変形の有無
遮蔽体積率 C_v : 植生層内の単位空間に占める植生の割合 [%]
流入風速 U : $U_0=5.95\text{ m/s}$ のときの流入風速 [m/s]
軌道: サルテーション軌道解析の有無



写真一 コウボウムギ型・変形モデル (IIIa) の植生層



図一 測定部内の植生の設置位置 (Top View)

て変形可能なコウボウムギ型モデルと類似の形状になるように作成し、葉の長さ 125 mm 、幅 10 mm の 4 枚を 1 重にして 1 株とした。これらのモデルの砂面上高さは $60 \sim 65\text{ mm}$ である。

* 学生会員 工修 筑波大学大学院工学研究科
** 正 会 員 工博 筑波大学助教授 機能工学系
*** 正 会 員 工博 筑波大学教授 機能工学系

海浜でパッチ状に存在する植生層を想定し、植生領域の流下方向長さを 350 mm とし、24~83 株のモデルを 35~71 mm 間隔で千鳥状または格子状に設置した(図-1)。

3. 実験方法

3.1 平均風速分布の測定

平均風速の鉛直分布はピトー管を用いて測定した。測定位置は、植生領域の上流端を $y=0$ mm とし、風洞のスパン方向中央($x=0$)に沿って、 $y=-100$ mm, 100 mm, 250 mm, 450 mm の地点である(図-1)。風速分布測定時のファンの回転数は、飛砂による地形変化の影響を小さくするため、飛砂の発生が始まる $U_0=5.95$ m/s に設定した。

3.2 砂面高変化の測定

表-1 に示す各植生層について、15 秒間風を作用させた後レーザー変位計を用いて地形の計測を行うという操作を連続して 4 回行い、計 60 秒間風を作用させたときの地形変化を調べた。初期地形と風を作用させた後の地形の差を砂面高の変化とした。図-1 に示す風洞のスパン方向 $x=-100\sim 100$ mm、流下方向 $y=-100\sim 450$ mm の範囲をそれぞれ 5 mm の間隔で、 x 方向 41 点、 y 方向 111 点の総計 4551 点で砂面高を計測した。

3.3 砂粒子のサルテーション軌道の解析

Zou ら (2001) は、植生層が存在しないときの飛砂に関する風洞実験を行い、高速度ビデオカメラを用いて砂粒子のサルテーション軌道の解析を詳細に行っている。ここではデジタルビデオカメラを用い、表-1 に示す 5 ケースについて、Zou らと同様にサルテーション高さ h と水平速度に関する解析を行った。スライドプロジェクトを用いて $x=0$ mm の断面に幅約 2 mm のスリット光を照射し、 $U_0=6.98$ m/s のときの砂粒子のサルテーション軌道をデジタルビデオカメラで撮影した。撮影範囲は、 $y=350\sim 500$ mm (植生領域風下側)の砂面上 0~100 mm の領域が含まれるように設定した。10 秒間の記録から 1/30 秒の間隔で PC に画像を取り込み、総計 300 枚の画像からサルテーション軌道を追跡した。ただし、サルテーションの発生が少ない場合には 600 枚の画像を解析した。各画像の露出時間は約 1/30 秒である。

4. 実験結果

4.1 平均風速分布

図-2 に平均風速の鉛直分布を示す。図-2(a)の風速分布には、平板上の境界層の発達過程が見られる。棒型植生層についての実験 (b)~(d) では、遮蔽体積率 C_v (表-1 参照) が大きいほど植生層内の風速が急激に減衰していた。

遮蔽体積率 C_v がほぼ等しい棒型・非変形植生層 (c) とコウボウムギ型・非変形植生層 (e) の風速分布を比較すると、コウボウムギ型の風速の減衰が大きく、コウボウムギ型植生層が有する風速減衰効果は棒型と比べて相対的に大きいと考えられる。また、コウボウムギ型植生層内では風速分布の鉛直方向の変化が大きかった。

コウボウムギ型・変形植生層 (f) (g) 内の風速分布特性は他と比較してかなり異なっており、植生の葉が密集している砂面上 40 mm 付近の風速が大きく減衰していた。

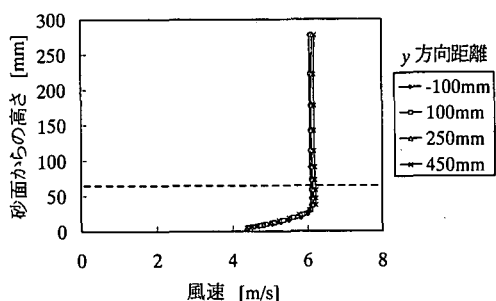
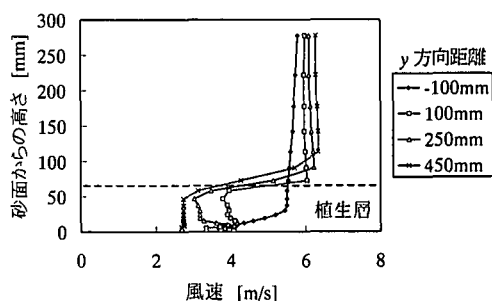
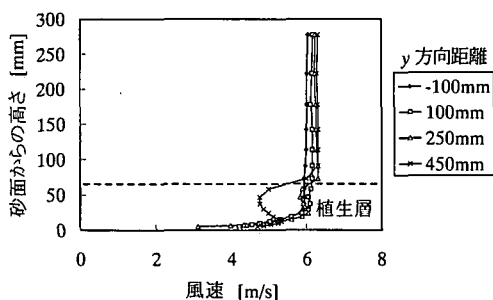
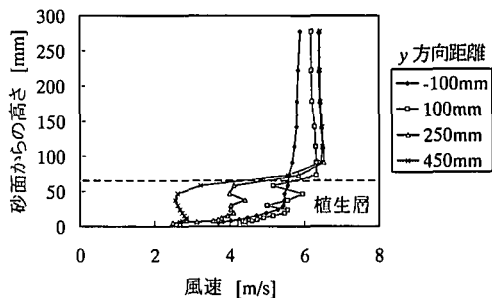
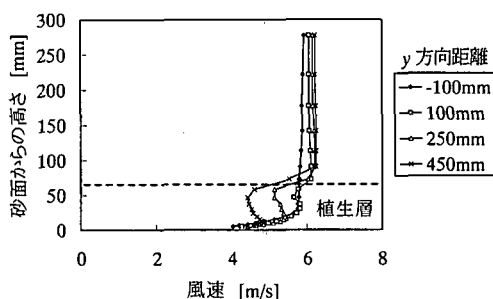
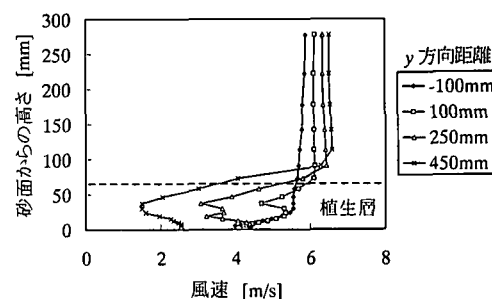
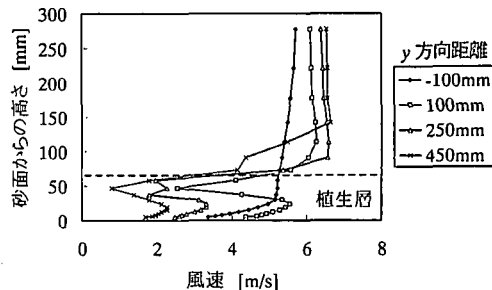
4.2 砂面高の変化

60 秒間風を作用させた時点での、 x 方向に計測された 41 データを平均した y 方向の平均砂面高変化を図-3 に示す。コウボウムギ型・非変形植生層 (e) においては、 U が 7.50 m/s 以上の場合に $y=150$ mm 付近より風上側に侵食傾向にあり、風下に向かって徐々に堆積する傾向にあった。コウボウムギ型・変形植生層 (f) (g) においては、それぞれ U が 6.65 m/s および 6.30 m/s 以上の場合に類似の砂面高変化が見られた。しかし、棒型・非変形植生層 (b) (c) の場合には堆積する領域が見られず、むしろ植生層なし (a) の場合と比較してやや侵食が促進される傾向にあった。

$U=8.20$ m/s のときのコウボウムギ型・変形植生層の各時間帯における平均砂面高の変化を図-4 に示す。0~15 s の時間帯にやや変化が大きいものの、全体的にはほぼ一定の割合で変化が進んでいた。他の実験ケースについても類似の変化が見られた。

4.3 砂粒子のサルテーション軌道

植生領域風下側 ($y=350\sim 500$ mm) で得られた 300 枚の画像(図-5)より、植生層なし (I) のとき 28 個、棒型・非変形植生層の IIa のとき 9 個、IIc のとき 172 個、コウボウムギ型・非変形植生層 (IIIa) のとき 29 個、コウボウムギ型・変形植生層 (IIIa) のとき 110 個のサルテーション軌道を読み取り、サルテーションの高さ H および最高点付近の水平速度 V を調べた。捉えられた軌跡の数は、単位時間に単位面積の砂面から発生する飛砂数(飛砂発生量)におおよそ比例すると考えられる。なお、IIa についてはデータ数が少ないため、300 枚の画像を追加し、合計 31 個の軌道を解析した。図-6 に H と V の関係を示す。飛砂発生量が少ない植生層なし (I)、棒型・非変形植生層 (IIa) およびコウボウムギ型・非変形植生層 (IIIa) では、 $H: 7.5$ mm 以下、 $V: 1.0$ m/s 以下にこれらの分布が集中していたのに対し、飛砂発生量が最も多い棒型・非変形植生層 (IIc) では、 $H: 12.5$ mm 以下に分布が集中していた。コウボウムギ型・変形植生層 (IIIa) では、 $H: 12.5$ mm 以下、 $V: 0.75$ m/s 以下に分布が集中しており、 V が小さくなっていた。

(a) 植生層なし (I, $U = U_0 = 5.95$ m/s)(d) 棒型・非変形植生層 (IIc, $U = 5.62$ m/s, $C_v = 2.26$)(b) 棒型・非変形植生層 (IIa, $U = 5.79$ m/s, $C_v = 0.57$)(e) コウボウムギ型・非変形植生層 (IIIa, $U = 5.63$ m/s, $C_v = 1.14$)(c) 棒型・非変形植生層 (IIb, $U = 5.76$ m/s, $C_v = 1.13$)(f) コウボウムギ型・変形植生層 (IIIa, $U = 5.68$ m/s, $C_v = 0.63$)図-2 平均風速分布 ($U_0 = 5.95$ m/s, (a)~(c))(g) コウボウムギ型・変形植生層 (IIIb, $U = 5.35$ m/s, $C_v = 1.25$)図-2(続き) 平均風速分布 ($U_0 = 5.95$ m/s, (d)~(g))

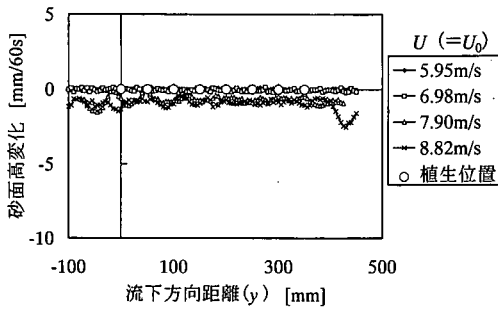
5. 考 察

5.1 植生層の遮蔽体積率が飛砂に与える影響

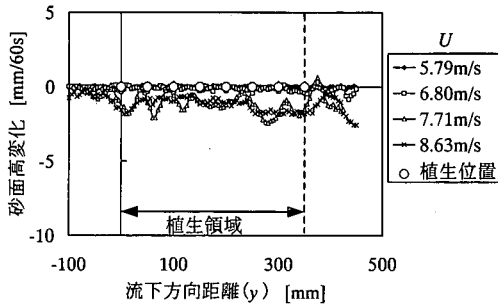
棒型植生層の風速分布には、植生層の遮蔽体積率 C_v が大きいときほど植生層内の風場の減衰が大きくなる、という従来の諸報告と類似の結果が見られる。一方、 C_v が小さいとき (IIa) の砂面高変化は、植生層が存在しない場合よりも大きく、侵食が進んでいた。また、サルテーション軌道解析結果より、 C_v が大きい場合 (IIc) に植生層風下側における飛砂発生量が大きかった。これらは、 C_v が大きくなるにつれて植生モデル周辺に発生する乱れが大きくなり、飛砂が増大していたことを示唆している。今後、風場の乱れに関する検討を要する。

5.2 植生の形状が飛砂に与える影響

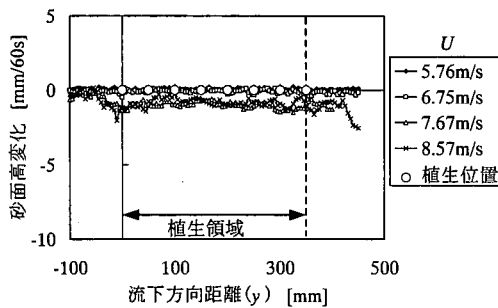
遮蔽体積率 C_v がほぼ等しい棒型・非変形植生層 (IIb) とコウボウムギ型・非変形植生層 (IIIa) の植生層内での風速分布は異なっており、コウボウムギ型では風速の減



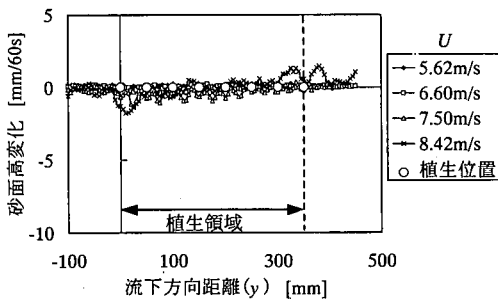
(a) 植生層なし (I)



(b) 棒型・非変形植生層 (IIa, $C_v=0.57$)

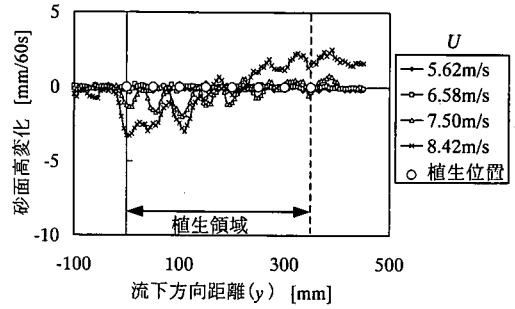


(c) 棒型・非変形植生層 (IIb, $C_v=1.13$)

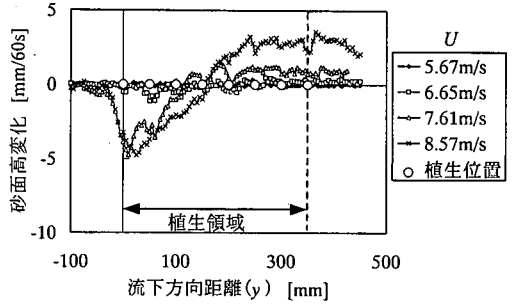


(d) 棒型・非変形植生層 (IIc, $C_v=2.26$)

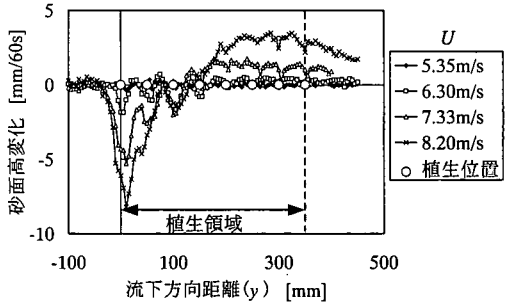
図-3 60秒間の平均砂面高変化 ((a)~(d))



(e) コウボウムギ型・非変形植生層 (IIIa, $C_v=1.14$)



(f) コウボウムギ型・変形植生層 (IIIa, $C_v=0.63$)



(g) コウボウムギ型・変形植生層 (IIIb, $C_v=1.25$)

図-3(続き) 60秒間の平均砂面高変化 ((e)~(g))

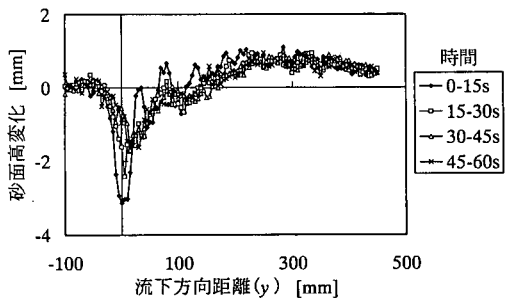
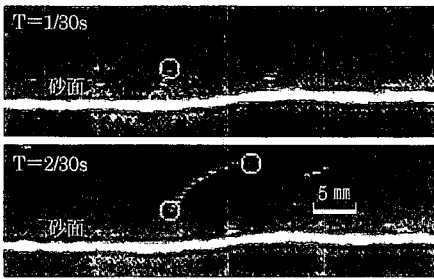


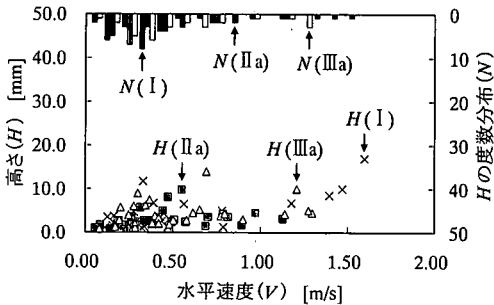
図-4 コウボウムギ型・変形植生層の各時間帯の平均砂面高変化 (IIIb, $U=8.20$ m/s, $C_v=1.25$)

衰が大きく、また、風速分布の鉛直方向変化が大きかった。風速分布の変化が大きい原因としては植生層上部と下部のモデル形状が異なり、局所的な遮蔽体積率に鉛直分布があることが挙げられる。棒型植生層の砂面高変化

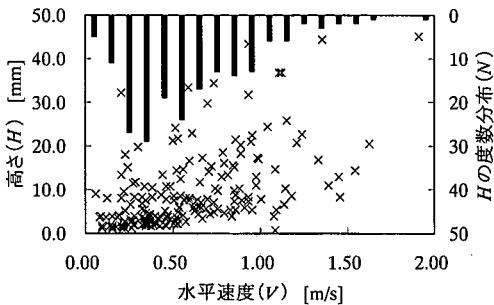
の結果には、コウボウムギ型植生層で見られる植生領域風上側の侵食および風下側の堆積傾向があまり見られなかった。両者の流入風速 U がほぼ等しいことを考慮して、植生領域より風上側における飛砂量はほぼ等しいと考え



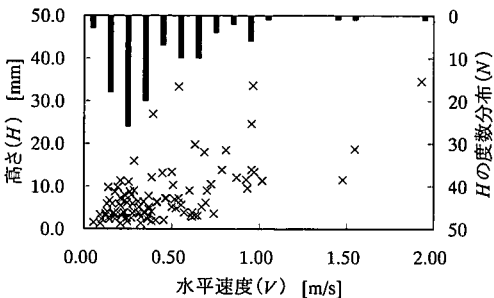
図—5 砂粒子のサルテーション軌道の例(○軌跡の始終端)



(a) 植生層なし (I, $U = U_0 = 6.98$ m/s, 28 データ)
 棒型・非変形植生層 (IIa, $U = 6.80$ m/s, 31 データ)
 コウボウムギ型・非変形植生層 (IIIa, $U = 6.58$ m/s, 29 データ)



(b) 棒型・非変形植生層 (IIc, $U = 6.65$ m/s, 172 データ)



(c) コウボウムギ型・変形植生層 (IIIa, $U = 6.30$ m/s, 110 データ)

図—6 植生領域風下側における砂粒子のサルテーション軌道 ($U_0 = 6.98$ m/s)

ると、コウボウムギ型の場合には、植生領域風上側では相対的に飛砂量が多いが、風下側では風速の減衰により飛砂量が減少していたと判断される。

5.3 植生の揺動の有無が飛砂に与える影響

コウボウムギ型の非変形および変形植生層の風速分布を比較すると、変形植生層の場合には葉が密集している砂面上 40~50 mm 付近の風速が大きく減衰していた。この高さにおける変形植生層の局所的な遮蔽体積率が非変形植生層より小さいにもかかわらず、風速の減衰が大きいことから、植生層の揺動が風場に大きな影響を与えていたと考えられる。砂面高変化の結果には、非変形植生層と比べて変形植生層の場合に、より顕著に植生領域風上側の侵食および風下側の堆積傾向が見られた。前節と同様に植生領域より風上側における両者の飛砂量はほぼ等しいと考え、植生の揺動があるとき、植生層風上側における飛砂量は大きく、風下側で顕著に減少しているが、その原因については不明である。非変形と変形植生層のサルテーション軌道解析の結果を比較すると、後者の飛砂発生量は相対的に多いが、サルテーション水平速度 V が小さくなっていた。水平速度 V が小さくなる原因として、サルテーション高さ H が集中して分布している、砂面からの高さが 0~10 mm の範囲の平均風速分布が小さいことが考えられる。

6. 結 論

1) コウボウムギ型植生層では棒型の場合と比較して、植生領域風上側での侵食が多いが、植生層内の風速の減衰により、風下側での堆砂が顕著であった。

2) 柔軟性のあるコウボウムギ型植生層では、風下側のサルテーションの水平速度が小さくなっていた。

植生形状の差異ならびに可動性の有無により、植生領域における風速分布および飛砂特性は顕著に異なっていたことから、適当な植生層を用いることで効率の良い飛砂制御が可能であると考えられる。

参 考 文 献

- 有働恵子・武若 聡 (2001): 後浜の地形変動に関する研究, 土木学会論文集, No. 677, II-55, pp. 175-187.
 辻本哲郎・西澤謙二 (1999): 海岸植生を用いた飛砂制御に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 506-510.
 Zou, X. Y. ら (2001): The distribution of velocity and energy of saltating sand grains in a wind tunnel, Geomorphology, 36, pp. 155-165.