

植生領域の飛砂と風場に関する実験的研究

有働 恵子*・武若 聡**・西村 仁嗣***

様々な植生層を用いて風洞実験を行い、植生形態が飛砂と風場に及ぼす影響を調べた。植生層のパラメータとしては、植生モデルの形状および高さ、変形の有無、ならびに遮蔽体積率（単位空間に占める植生の割合）を用いた。60秒間風を作用させたときの植生領域の砂面高変化を調べた結果、植生層の遮蔽体積率が大きく、植生層高が小さい場合に植生層周辺は堆砂傾向にあった。植生領域の平均風速分布、風場の乱れ、ならびに砂粒子のサルテーション軌道を調べた結果、サルテーション水平速度は風場の乱れが大きいほど顕著に減衰し、サルテーション高さは主流の流況パターンにより異なっていた。

1. はじめに

海岸植生は飛砂を捕捉・抑制する効果を有するが、このメカニズムに関する研究は少ない。有働ら（2002）は植生形態および柔軟性の異なる植生モデルを用いた風洞実験を行い、植生領域の砂面高変化、平均風速分布、ならびに砂粒子のサルテーション軌道について調べている。その結果、植生の揺動が飛砂および風場に大きな影響を与えていることは明らかにされたものの、風場が飛砂に与える影響等については不明な点が残されている。本研究では、植生層の高さが有働ら（2002）と比較して小さい場合についても同様の実験を行い、植生層の高さの影響を調べた。また、植生領域の風場を可視化し、風場の飛砂への影響を検討した。

2. 実験装置

(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) 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を表-1に示す。植生層が存在しないIおよび植生層高さが $50 \sim 70\text{ mm}$ のIV~VIについては、有働ら（2002）が実験を行っている。植生層IIおよびIIIの高さは $10 \sim 15\text{ mm}$ で、直径 6 mm のストローおよびPETフィルムを用いてそれぞれ作成した。ハマヒルガオ型モデル（III）の葉は直径 40 mm の円形で、4枚で1株とした。植生層IIIおよびVIは変形可能で、風を作用させると葉が揺動す

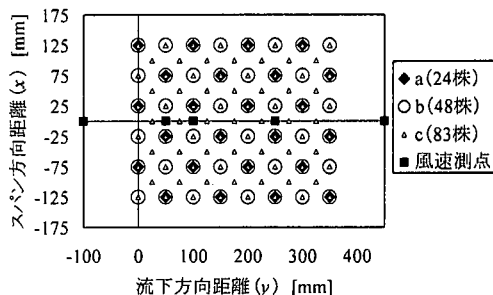


図-1 測定部内の植生の設置位置 (Top View)

る。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 として $24 \sim 83$ 株のモデルを $35 \sim 71\text{ mm}$ 間隔で千鳥状または格子状に設置した（図-1）。

3. 実験方法

(1) 砂面高変化の測定

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変化とした。図-1に示すスパン方向 $x = -100 \sim 100\text{ mm}$ および流下方向 $y = -100 \sim 450\text{ mm}$ の範囲をそれぞれ 5 mm の間隔で、総計4551点について計測を行った。

(2) 平均風速分布の測定

図-1に示すスパン方向中央線上 ($x = 0\text{ mm}$) の $y = -100 \sim 450\text{ mm}$ の5点において、ピトー管を用いて平均風速分布の測定を行った。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 $U_0 = 5.95\text{ m/s}$ に設定した。

(3) 植生領域の風場の可視化

スモークワイヤ法により、植生領域の風場の可視化を行った。植生層高が大きい場合および高風速時には風場の可視化が困難であるため、表-1に示す植生層I~IIIの4ケースについて、ファンの回転数を $U_0 = 5.95$ および 6.98 m/s に設定して可視化を行った。

* 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 砂研研究室

** 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

表-1 植生層の諸元

植生モデル形状	植生配置	植生層記号	変形	植生層高	C_v	U	風場	軌道
I 植生層なし	—	I	—	—	0.00	5.95	○	28
II 棒型 10	a (24 株)	II a	無	10 mm	0.09	5.95	—	—
	b (48 株)	II b			0.17	5.95	○	25
	c (83 株)	II c			0.35	5.93	○	—
III ハマヒルガオ型	a (24 株)	III a	有	10~15 mm	0.17	5.77	○	33
IV 棒型 65	a (24 株)	IV a	無	65 mm	0.57	5.79	—	9 [31]
	b (48 株)	IV b			1.13	5.76	—	—
	c (83 株)	IV c			2.26	5.62	—	172
V コウボウムギ型	a (24 株)	V a	有	60~65 mm	1.08	5.62	—	29
VI コウボウムギ型	a (24 株)	VI a	無	50~70 mm	0.54	5.67	—	110
	b (48 株)	VI b			1.09	5.35	—	—

変形：変形の有無，植生の配置：図-1参照，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 ： $U_0=5.95$ m/s のときの流入風速 [m/s]，風場：風場可視化の有無

軌道：300 枚の画像から取得したサルテーション軌道のデータ数 ([] 内は 600 枚の画像から取得したデータ数 N)

結び目を作った金属線に流動パラフィンを塗布し，線の両端に電圧を加えると，結び目から煙が発生する。ここでは 10 mm 毎に結び目を作ったステンレス線を (x, y) = (0 mm, -165 mm) の位置に鉛直方向に張り， $x=0$ mm の断面の風場を可視化した。この様子をシャッター速度 1/2000 s のデジタルカメラで撮影し，得られた画像から砂面に最も近い追跡可能な流脈線を抽出して乱れの解析を行った。流脈線の追跡開始位置は $y=-100$ mm および砂面からの高さ $z=45$ mm である。この流脈線は，植生層内の流脈線と比較して，多少風下側に空間的ずれを生じていると考えられるが，植生層内の風場の乱れを反映したものになっていると推察される。

(4) 砂粒子のサルテーション軌道の解析

表-1 (軌道) に示す 7 ケースについて，植生領域風下側における砂粒子のサルテーション高さや最高点付近の水平速度を調べた。スライド 프로젝タを用いて $x=0$ 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 $y=350\sim500$ mm および $z=0\sim100$ 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 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，さらに 10 秒間の記録を解析した。

4. 実験結果

ここでは，植生層高が比較的小さい棒型 10 (II) およびハマヒルガオ型 (III) の場合の結果を中心に図示する。他の結果については有働ら (2002) を参照されたい。

(1) 砂面高変化

図-2 に，棒型 10 (II b, II c) およびハマヒルガオ型植生層 (III a) の場合の，スパン方向に平均した流下方向の砂面高変化を示す。植生層高が比較的大きい棒型 65 (IV) およびコウボウムギ型 (V, VI) の場合と同様

に，遮蔽体積率 C_v が大きく，変形可能な植生層の場合に堆砂傾向は大きかった。また，植生層高が小さい場合に堆砂傾向は大きかった。変形可能な植生層 (III, VI) の場合には堆砂および侵食領域の形成が明確に見られたが，これらの領域の境界は植生層高が小さい場合 (III) に，より風上側に位置していた。

(2) 平均風速分布

図-3 に，棒型 10 (II b, II c) およびハマヒルガオ型植生層 (III a) の場合の平均風速分布を示す。植生層高が比較的大きい棒型 65 (IV) およびコウボウムギ型 (V, VI) の結果と同様に，遮蔽体積率 C_v が大きく，変形可能な植生層の場合に植生層内の風速は顕著に減衰していた。

植生層高が比較的大きい場合には， $z=40$ mm 付近で風速が顕著に減衰し， $z=20$ mm 付近で風速が増加して，砂面付近でさらに風速が減衰する，という傾向が見られたが，小さい場合にはこのような傾向は見られず，砂面に近づくにつれて風速は減衰していた。

(3) 植生領域の風場

図-4 に，植生層なし (I)，棒型 10 (II b, II c)，ならびにハマヒルガオ型 (III a) の場合の風場の可視化画像を示す。 $U_0=5.95$ m/s のときの II c を除く 3 ケースについて，各 50 データ抽出した流脈線とその鉛直方向の平均位置，ならびに標準偏差 (SD) を図-5 に示す。I および II の場合には $U_0=5.95$ m/s と 6.98 m/s のときで平均位置と SD に大きな差異は見られなかった。III の場合には，平均位置については大きな差異は見られなかったが，SD は U が大きいときに，より顕著に大きくなっていった。

I の場合について $U_0=5.95$ m/s のときの $z=45$ mm および 60 mm 付近から発生する流脈線の平均位置を図-6 に示す。図より， $z=45$ mm 付近から発生する流脈線は流下方向にやや低下する傾向にあるのに対し， $z=60$ mm 付近から発生する流脈線はやや上昇していた。こ

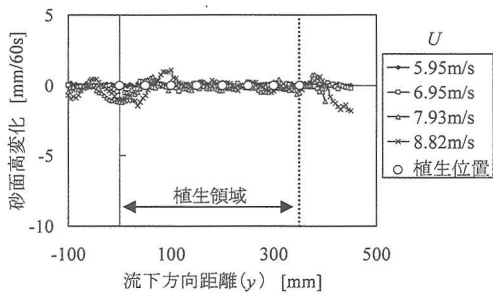
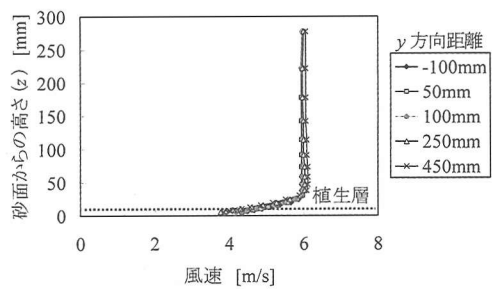
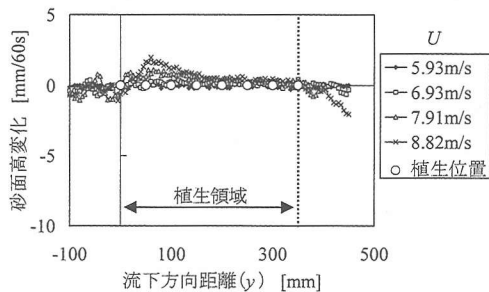
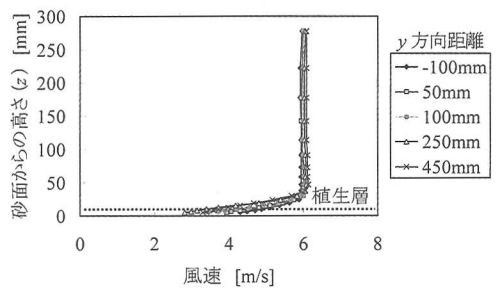
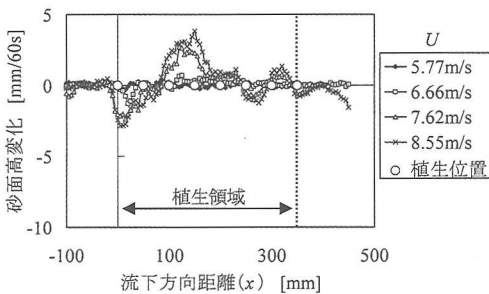
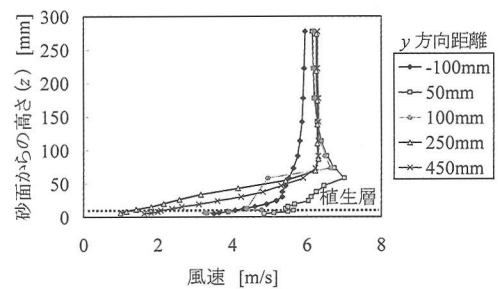
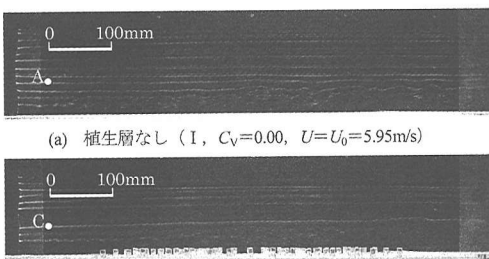
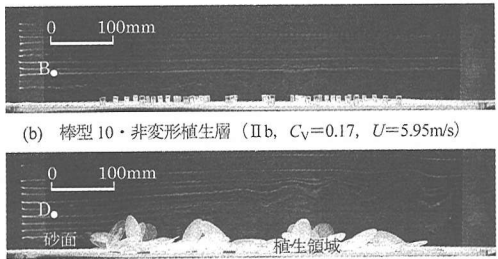
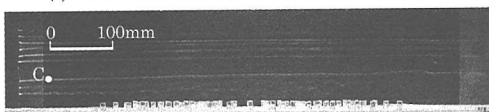
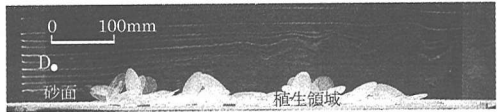
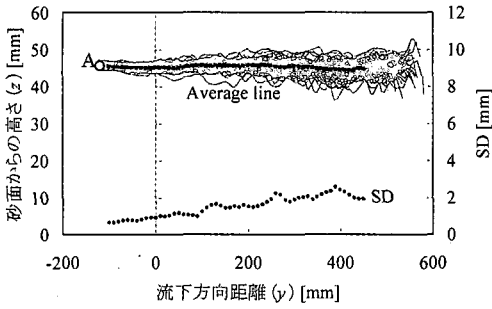
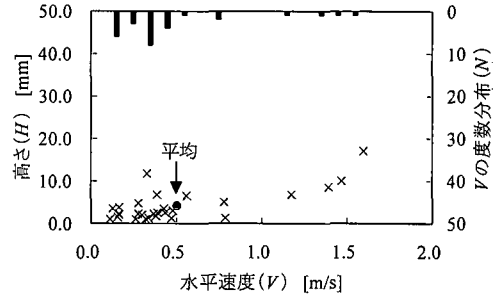
(a) 棒型 10・非変形植生層 (IIb, $C_V=0.17$)(a) 棒型 10・非変形植生層 (IIb, $C_V=0.17$, $U=5.95$ m/s)(b) 棒型 10・非変形植生層 (IIc, $C_V=0.35$)(b) 棒型 10・非変形植生層 (IIc, $C_V=0.35$, $U=5.93$ m/s)(c) ハマヒルガオ型・変形植生層 (IIIa, $C_V=0.17$)(c) ハマヒルガオ型・変形植生層 (IIIa, $C_V=0.17$, $U=5.77$ m/s)

図-2 砂面高変化

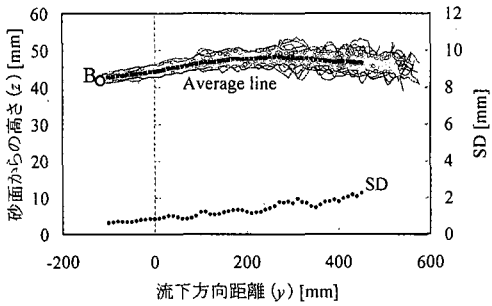
図-3 平均風速分布 ($U_0=5.95$ m/s)(a) 植生層なし (I, $C_V=0.00$, $U=U_0=5.95$ m/s)(b) 棒型 10・非変形植生層 (IIb, $C_V=0.17$, $U=5.95$ m/s)(c) 棒型 10・非変形植生層 (IIc, $C_V=0.35$, $U=5.93$ m/s)(d) ハマヒルガオ型・変形植生層 (IIIa, $C_V=0.17$, $U=5.77$ m/s)図-4 スモークワイヤ法による風場の可視化 ($U_0=5.95$ m/s, 点 A~D: 流脈線追跡開始点 (図-5 参照))



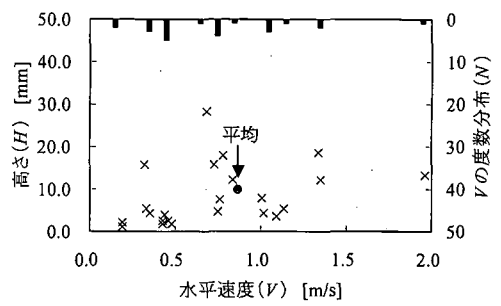
(a) 植生層なし (I, $C_V=0.00$, $U=U_0=5.95\text{m/s}$)



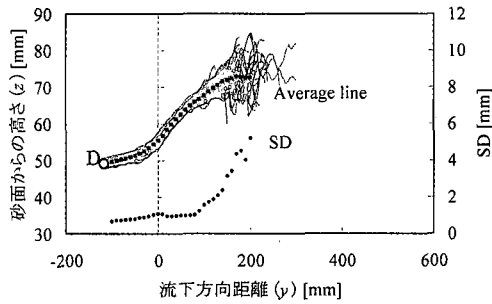
(a) 植生層なし (I, 28 データ)



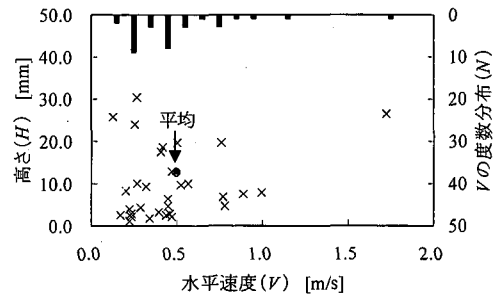
(b) 棒型 10・非変形植生層 (IIb, $C_V=0.17$, $U=5.95\text{m/s}$)



(b) 棒型 10・非変形植生層 (IIb, 25 データ)



(c) ハマヒルガオ型・変形植生層 (IIIa, $C_V=0.17$, $U=5.77\text{m/s}$)



(c) ハマヒルガオ型・変形植生層 (IIIa, 33 データ)

図-5 流脈線 (各 50 データ, $U_0=5.95\text{ m/s}$)

SD: 標準偏差, 点 A~D: 図-4 参照

図-7 植生領域風下側におけるサルテーション ($U_0=6.98\text{ m/s}$)

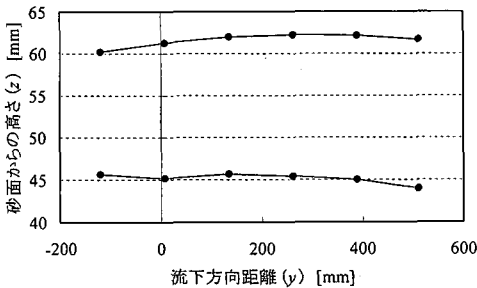


図-6 植生層なし (I) の場合の $z=45\text{ mm}$ および 60 mm から発生する流脈線の平均位値の比較 ($U_0=5.95\text{ m/s}$)

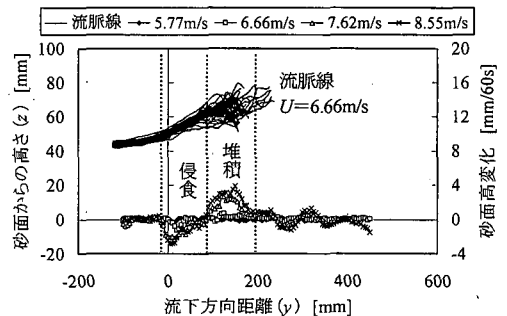


図-8 ハマヒルガオ型植生層 (III a) の場合の流脈線と砂面高変化の比較

れは、 $z=45$ mm 付近は境界層内にあり、風場の乱れの影響を強く受けて煙が下方に拡散していたことを示している。

(4) 砂粒子のサルテーション軌道の解析

植生層なし (I), 棒型 10 (II b), ならびにハマヒルガオ型 (III a) の場合について、サルテーション高さ H と最高点付近の水平速度 V の関係を図-7 に示す。I の場合については、 H と V の間に正の相関関係が認められた。取得データ数 (表-1 参照) が比較的少ない II b, III a, IV a, ならびに V a の場合については、植生層高が大きい場合には H が 15 mm 以下に分布していたのに対し、小さい場合には 30 mm 以下に分布しており比較的 H が大きかった。また、変形植生層の場合に比較的 V が小さくなっていた。I 以外の場合については、 H と V の間に明確な相関関係は見られなかった。

5. 考 察

(1) 植生層の遮蔽体積率および高さが飛砂に与える影響

棒型植生層 (II, IV) の風速分布および砂面高変化の結果には、密生度が大きく植生層高が小さいほど植生領域は堆砂傾向にあるという、辻本・西澤 (1999) の報告と同様の傾向が捉えられていた。一方、棒型 65 植生層で遮蔽体積率 C_v が小さい場合 (IV a) の砂面高変化は、植生層なし (I) の場合と比較して侵食傾向にあったが、大きい場合 (IV c) には、植生層風上側で侵食傾向にあるものの、風下側では堆砂傾向であった。これは、植生層を設置すると、植生モデルの根元周辺で洗掘が起こり飛砂量は増加するが、 C_v が大きい場合には流下方向に風速が減衰するため、飛砂量が減少していたと説明される。

平均風速分布の結果より、植生層高が小さい場合には主流のかなりの部分が植生層の上方に流れるのに対し、大きい場合には主流の一部が植生層内に流れ込む流況となっていた。サルテーション軌道の解析結果より、植生層高が小さい場合にサルテーション高さ H が大きくなっていたが、これは主流が砂面から比較的高い位置を流れていたためと考えられる。

(2) 植生層で発生する乱れが飛砂に与える影響

砂面高変化の結果には、変形植生層 (III, VI) の場合に侵食および堆積領域が明確に見られ、植生層高が小さい場合にこれらの領域の境界はより風上側に位置していた。これは、その境界前後では植生層内の風速が顕著に減衰しているが、植生層高が小さい場合に、より風上側で減衰していたためと考えられる。

変形植生層 (III a) の流脈線の結果より、植生の揺動に

よって風場に大きな乱れが発生していた。III a における砂面高変化および $U=6.66$ m/s のときの流脈線を図-8 に示す。砂面高は $x=-25$ mm $\sim$ 75 mm の領域では侵食傾向にあり、 $x=75$ mm $\sim$ 200 mm の領域では堆積傾向にあるが、この境界付近で風場の乱れは急激に大きくなっていた。この付近では風速の減衰も大きくなっており、乱れによって平均風速が減衰していたと考えられる。また、砂粒子のサルテーション軌道の解析結果より、変形植生層の場合にサルテーション水平速度 V は小さくなっていた。以上より、植生層で発生した乱れにより平均風速が減衰し、これによって V は小さくなっていたと考えられる。

飛砂量は、砂面からの砂の離脱確率密度 (pick-up rate) とサルテーション長 (step length) の積で概算できると考えられる (Einstein, 1942)。サルテーション軌道の取得データ数は、砂の離脱確率密度の指標になると期待されたが、表-1 に示した取得データ数と砂面高変化より求めた植生領域風下側の飛砂量との間には、明確な相関関係は認められなかった。これは、サルテーション高さ H が小さい跳躍移動や掃流移動を追跡できなかったためと考えられる。一方、サルテーション長は V の 2 乗におおよそ比例すると考えられる (河村, 1951)。風場の乱れにより V は小さくなっていたことから、植生領域のように風場の乱れが大きい場においてはサルテーション長が顕著に小さくなると考えられる。

6. 結 論

- 1) 植生層内の風速は、植生層高が小さいときには主流が植生層の上方を流れるため小さくなるのに対し、植生層高が大きいときにはその一部が植生層内に流れ込むため比較的大きくなっていた。
- 2) 植生層で発生する乱れにより、植生層内の風速は大きく減衰し、これにより砂粒子のサルテーション水平速度は小さくなっていた。
- 3) 砂粒子のサルテーション高さは、主流の流況パターンにより異なっていた。

参 考 文 献

- 有働恵子・武若 聡・西村仁嗣 (2002): 植生領域の飛砂に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 636-640.
 河村竜馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 第 5 巻, pp. 95-112.
 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.
 Einstein, H. A. (1942): Formulas for the transportation of bed load, Trans. ASCE, Paper No. 2140, pp. 561-597.