

透過傾斜型株模型周辺における風場と飛砂発生特性 に関する風洞実験

田中規夫*・渡辺 肇**・城野裕介***・高木利光****

海浜安定化に寄与するコウボウムギ群落周辺の飛砂の特性を明らかにするため、コウボウムギ群落をモデル化した透過型傾斜粗度模型を用いて風洞実験を行い、群落周辺の風場と砂面変化を測定した。コウボウムギ群落周辺の飛砂現象には群落形状の傾きによってもたらされる透過風速と側方風速の変化が大きくかかわっており、風速分布、砂の堆積位置から群落形状の傾斜角度が 45° の場合に実際のコウボウムギに最も似た傾向にあることを示した。また、まばらな粗度空間で近接した 2 群落周辺においては、一様に広がる場合と同じコロニー間隔でも飛砂発生量は多くなる場合があり、その量は群落形状の傾斜角度によって大きく変化することが判明した。

1. はじめに

海浜に生育する砂草は飛砂等による地形変化を抑制することが知られ、砂草の移植などによる海浜の安定帯の確保が行われている(田中ら, 2002・城野ら, 2003)。日本における在来種で汀線付近に生育するコウボウムギ(延原, 1960)は、海浜の厳しい環境に優れた適応性を持つことから移植素材として注目されている。コウボウムギの粗度特性としては、①株状群落(以後、コロニーとする)を形成すること、②強風時に葉が傾斜すること、③群落が空隙を持つこと、が挙げられる。このコウボウムギコロニーは攪乱の影響を受けやすい後浜付近や、群落が飽和していない植生帯周辺部において粗く散在しており(図-1)、このような空間では、コロニー同士の相互干渉により一様に分布している群落とは異なる堆砂傾向を持っており、④コロニー間距離が重要となる。

このような粗度・分布特性をもつコウボウムギの風場特性を的確に把握するには、従来の研究において行われている正方・千鳥配列の直立円柱群模型(Musikら, 1996)や、風による震動を考慮した剛性模型(有働ら,

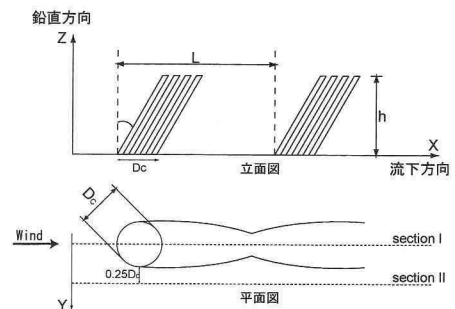


図-2 コウボウムギコロニー模型と記号の定義

2003)による実験では十分であるとは言えない。よって、本研究は、実物のコウボウムギと、遠州灘沿岸の静岡県竜洋海岸($34^\circ 38' N$, $137^\circ 48' E$)におけるコウボウムギ観測結果に基づき①から④を反映した透過型傾斜粗度模型(以下、コロニー模型とする)を用いて風洞実験を行い、まばらにコロニーが散在する群落周辺の風場と砂面変化から、地形変化に大きく寄与する飛砂の特性を明らかにするものである。

2. 風洞実験

(1) 実験装置

a) 風洞実験装置

風洞実験は、エッフェル型(吹き抜け型)風洞実験装置を使用して行った。この風洞実験装置の測定部は厚さ 1 cm のアクリル製で断面 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、流下方向長さ約 2 m のセクション 2 つで構成されており、30 m/s までの風速を発生させることができる。コロニー模型の前方には飛砂フラックスが安定するように 2.5 m の助走区間を設け、風速と砂面変化の測定は後方(2-4 m のセクション)で行った。また、最後流部には飛砂を捕捉する装置を設置した。アクリル部分には 6 cm の厚さ(砂の洗掘によりアクリル面が露出しない深さ)で砂を敷き詰めた。砂は竜洋海岸における底質(平均粒径 0.5 mm, 比重 2.65)を実験で再現するため、6 号珪砂(平均粒径 0.4 mm, 比重 2.65)を選定した。砂面は凹凸のないように均

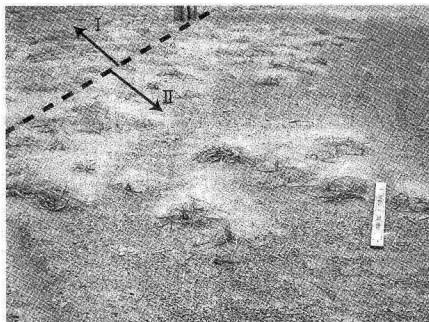


図-1 コウボウムギコロニーの分布例
(領域 I は面的に密集するが領域 II は場所によりコロニー間距離が大きく異なる)

* 正 会 員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科
** 正 会 員 工修 八千代エンジニアリング株式会社
*** 学生会員 埼玉大学大学院理工学研究科建設工学専攻
**** 正 会 員 工博 株式会社アイ・エヌ・エー

一にならすことで初期状態とした。

b) 粗度条件 (コロニー模型と実物)

コウボウムギコロニーは風を透過させ、さらに流下方向に葉が傾斜している。Musikら(1996)は、円柱群による実験より、単位海浜面積当たりにおける粗度の水平方向投影面積(以後、Lateral cover とする)が植物による砂の流動限界を考慮する上で重要な指標であることを示した。そこで、竜洋海岸に繁茂するコウボウムギを水平方向から写真撮影することで投影面積を算出した。現地観測により得られたコウボウムギの Lateral cover は $0.15 \sim 1.0 \text{ (m}^2/\text{m}^2)$ に分布しており、本研究ではコウボウムギを図-2 に示すような Lateral cover の範囲が等しい直径 5 mm の円柱群で表現した。すなわち、各円柱の本数・高さは同じ (10 cm) とし上記の実物コロニーの Lateral cover の範囲内に粗度条件を設定した。さらにコウボウムギは茎のある底面付近は傾き 0° に近い傾向を示し、葉を含めた形では 60° 程度傾いているため、実験は傾き $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のケースについて行った(傾きによって Lateral cover は変化し、 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ について、それぞれ $0.83, 0.36, 0.25 \text{ (m}^2/\text{m}^2)$ とした)。また、現地におけるコロニーがまばらに存在している状況を考慮するため、コロニー模型が間隔 $L = 0.3 \text{ m}$ で 2 つ存在している場合についても実験を行った。

次に、コロニー模型と相互比較を行うため、竜洋海岸においてサンプリングしたコウボウムギコロニーをコロニー模型と同じ位置に別途設置して実験を行った。設置の際には、送風中の乾燥を防ぐため、地下部を保水処理した状態で設置し、またサンプリング時に記録した葉の方向や株の配置などの繁茂状況を可能な限り再現した。なお、実験に用いたサンプルは、風洞側壁の影響を最小限にするため現地に繁茂しているコロニーにおいて小さいものを用いた。このコウボウムギコロニーを風洞内に設置した状態で lateral cover を算出した結果は $0.2 \sim 0.5 \text{ (m}^2/\text{m}^2)$ の値であり、コロニー模型と同等の値であった。

(2) 実験方法

a) 風速特性の測定

風速測定時は飛砂の発生による風速センサの破壊を防ぐため、初期状態の砂面に飛砂が発生しない程度の水分を与えた状態でを行った。風速は竜洋海岸における冬季の飛砂発生風速である 8 m/s を接近風速 U_0 として設定した。風速分布の測定には熱線風速計 (KANOMAX 0249R-T5) を用い、水平 (X)・鉛直 (Z) 方向の 2 成分を測定した。測定点は、図-2 に示したコロニー模型または実物コロニーの中央断面 (section I)、側方断面 (section II) の 2 測定断面において、 $X = -0.10 \sim 0.35 \text{ m}$ は 5 cm 間隔、 $X = 0.45 \sim 0.85 \text{ m}$ は 10 cm 間隔で 14 点、高さ方向

に $Z = 0.02 \sim 0.2 \text{ m}$ の 2 cm 間隔で 10 点の総計 140 点とした。測定データのサンプリング周波数はそれぞれの点において 100 Hz 、測定時間は 40 秒とし、サンプリングデータから各測点の時間平均風速 (X, Z 方向をそれぞれ U, V とする) と乱れ成分を示すレイノルズ応力を算出した。

b) 砂面変化量の測定

砂面変化測定時の砂面は乾燥状態とした。砂面変化量の測定には CCD 変位センサ (KEYENCE LK-500) を用い、砂面形状が平衡状態となり、以後相似的に砂面形状が変化する 15 分後に砂面形状を 3 次元的に測定した。測定点は各コロニー模型毎に $X = -0.44 \sim 1.16 \text{ m}$ 、 $Y = -0.2 \sim 0.2 \text{ m}$ の範囲を 0.02 m メッシュで測定した (総計 1701 点)。

c) 摩擦速度の算定

風洞上部にスライドプロジェクトを設置し、幅約 5 mm のスリット光を砂面に当てた状態で、接近風速 $U_0 = 8.0 \text{ m/s}$ の風を発生させ、飛砂状態を作り出した。そして、砂面上 $0 \sim 100 \text{ mm}$ の領域が含まれるようにその様子をデジタルカメラにて撮影し、画像処理による砂粒子の軌跡から高さ毎の風速を求め、対数分布則から摩擦速度を算定した。その結果、接近風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ の時の摩擦速度は $u_* = 0.68 \text{ m/s}$ となった。なお、使用した砂粒 (平均粒径 0.4 mm) の移動限界摩擦速度は $u_{*c} = 0.29 \text{ m/s}$ (接近風速 $U_0 = 6.2 \text{ m/s}$ の時がそれに相当) であった。

d) 抵抗の測定・抗力係数の算出

コロニー模型が受ける抗力は、Dexinら(2003)と同様に変位測定器を風洞底面の下に設置し測定した。測定装置は固定された枠に 4 本のピアノ線で、水平方向に自由に動く台を底面と水平に吊したものである。模型はこの台に風洞の底面上から 10 cm 出る位置で固定した。コロニー模型が風によって受ける抗力は Force gauge (AIKOH 9550A) を用いて測定し、

$$C_d = \frac{D_b}{1/2 \rho U_0^2 A} \dots \dots \dots (1)$$

の式を用いて抗力係数 C_d を算出した。ここに、 D_b は物体に働く抗力 (N)、 ρ は密度 (kg/m^3)、 A は実物コロニーまたはコロニー模型の水平方向投影面積 (m^2) である。接近風速は砂面変動計測実験時と同じ風速 8 m/s となるように設定した。

3. 実験結果

(1) 砂面変化量

図-3、図-4 はコロニー模型単体と 2 つのコロニー模型の場合の砂面コンター図である。単体の場合を比較すると、 $\theta = 0^\circ$ の場合、コロニー模型の両サイド風下斜めの位置にコロニー模型によって形成された渦による強い局所洗掘における砂面形状変化が起きていることが確認で

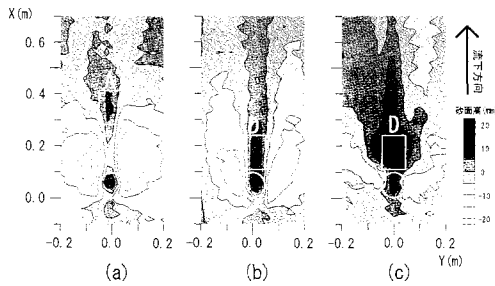


図-3 砂面コンター図 (単体)
(a) $\theta=0^\circ$ (b) $\theta=45^\circ$ (c) コウボウムギ実物 (A, Bは堆砂が生じた位置)

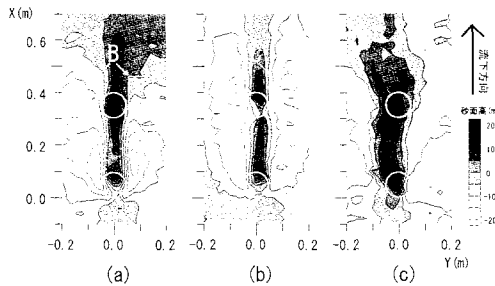


図-4 砂面コンター図 (2コロニー模型)
(a) $\theta=0^\circ$ (b) $\theta=45^\circ$ (c) コウボウムギ実物 (Bは堆砂が生じた位置, Cは洗掘が生じた位置)

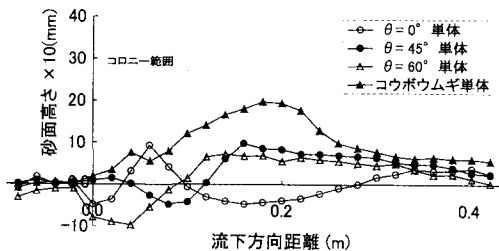


図-5 コロニー中央縦断面 (section I)

きる。コロニー模型後流域の堆砂状況を比較すると、 $\theta=0^\circ$ はコロニー模型直後ではなく、 $X=0.3\text{ m}$ 付近に堆砂が見られるのに対し、 $\theta=45^\circ$ と実物の場合にはコロニー模型またはコロニー直後から堆砂が見られる。これはコロニー模型内を透過する風速の違い、さらにはコロニー内を通過する底質移動量の違いによるものと考えられる。2コロニー模型の場合は、 $\theta=0^\circ$ では単体の場合に堆砂が起きた位置の後方のコロニー模型が存在するため、Bの位置において洗掘があまり生じない(2コロニー模型が一体化する)。それに対し、 $\theta=45^\circ$ の場合は後方のコロニー模型周囲(Cの位置)においても洗掘が生じた。

図-5は単体配置におけるコロニー模型3ケースとコウボウムギコロニーのそれぞれの実験における中央断面

(section I)の砂面変化量を比較したものである。 $\theta=45^\circ$ 、 60° の後流域砂面変化はコウボウムギコロニーと似た傾向を示しているが、模型の方が若干低い値をとることがわかる。コウボウムギコロニーの場合は、コロニー前面の洗掘があまり見られず(図-5)、周辺の洗掘が若干見られる程度である(図-3, 図-4)。これは、コロニー前面部にも枯葉などが存在し、茎のみをモデル化したコロニー模型によるものと比べ、その背後域が強い逆圧力勾配の状態にならず馬蹄形渦による洗掘が生じなかったためと考えられる。図-3, 4, 5を総合的に判断すると堆積形状のみでは、実物は $\theta=45^\circ$ に近い特性を持つと考えることができる。

(2) 風速分布・レイノルズ応力分布

図-6(a)~(d)に、それぞれ、 $\theta=0^\circ$ 、 45° 、 60° 、コウボウムギの中央断面(section I)における流下方向成分平均風速 U のコンター図と (U, V) の風向ベクトル図を合わせて示す。また、図-7(a)~(d)に、それぞれ、 $\theta=0^\circ$ 、 45° 、 60° 、コウボウムギの中央断面(section I)におけるレイノルズ応力の分布を示す。なお、 u' 、 v' はそれぞれ X 、 Z 方向の時間変動風速成分で、接近風速 U_0 で無次元化して示してある。

風速分布を見ると、角度が大きくなるにつれてコロニー模型を通過する風速(以後、通過風速)が速くなっていることが分かる。 $\theta=0^\circ$ の場合は通過風速が非常に遅く、接近風速の4割程度になる。図-7(a)のレイノルズ応力分布のピークは $X=0.45\text{ m}$ 、 $Z=0.05\text{ m}$ の地点となる。これは、群落上部・周辺部を通過した流れが、群落内部を通過した流れとの風速差によって強いせん断が生じているものと考えられる。

次に、 $\theta=45^\circ$ の場合(図-7(b))について見ると、中央断面において、コロニー模型背後にあたる $X=0.2\text{ m}$ の地点で通過風速が5割程度となることが分かる。 $\theta=45^\circ$ のレイノルズ応力分布を見ると、 $X=0.1\text{ m}$ の地点($\theta=0^\circ$ の場合よりもコロニー模型近く)でピークを持つことがわかる。 $\theta=60^\circ$ の場合(図-7(c))は角度による影響が最も顕著に表れている。コロニー模型により風向が変化し、上向きの輸送が起きていると考えられる。次に、コウボウムギの場合(図-7(d))であるが、通過風速の減少は $\theta=0^\circ$ の場合ほど顕著ではなく、 $\theta=45^\circ$ の場合と同程度である。これはコウボウムギの葉の部分が下流にたなびくため後流域に巻き込む流れを抑制すること、茎の部分は鉛直であるため上方向の流れを $\theta=60^\circ$ の場合ほど作り出さないためであること、等と関係していると考えられる。

(3) 透過風速と側方風速

中央断面(section I)の底面から模型の高さである 0.1 m までの通過風速の平均値を透過風速 u_t 、側方断面(sec-

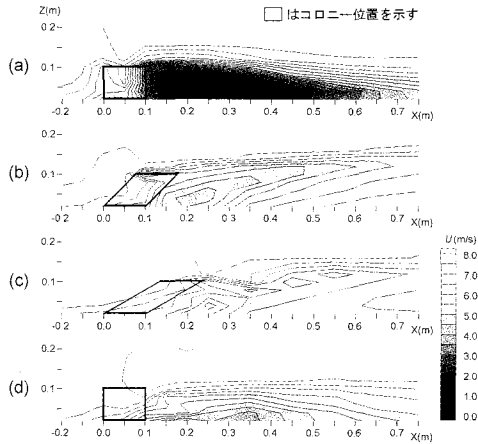


図-6 中央断面 (section I) における風速コンター図
(a) $\theta=0^\circ$ (b) $\theta=45^\circ$ (c) $\theta=60^\circ$ (d) コウボウムギ実物

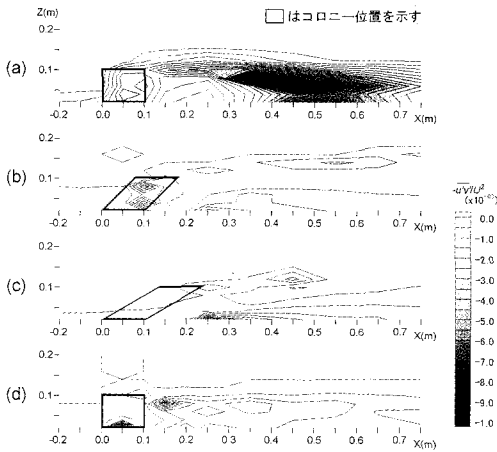


図-7 中央断面 (section I) におけるレイノルズ応力コンター図
(a) $\theta=0^\circ$ (b) $\theta=45^\circ$ (c) $\theta=60^\circ$ (d) コウボウムギ実物

tion II) の同範囲の平均風速を側方風速 u_2 と定義し、コロニー模型の傾きとの関係を整理した (図-8)。側方風速はどのケースにおいても同等の値となったが透過風速はコロニー模型の傾きにより大きく変化した。その結果、図-8 に示したように θ が大きくなると u_1 と u_2 の風速差が小さくなり、風速差によって後流域に回り込む流れが小さくなった。 $\theta=0^\circ$ では風速差が大きいため、側方からコロニー模型後流域に回り込む流れによる砂の堆積が卓越した (図-3 の A 位置)。他の 3 ケースは、角度が大きくなるに従って風速差は小さくかつ透過風速が大きくなるため、コロニーを透過した砂が堆積したと考えられる (図-3 の D 位置)。それが、図-3 の場合の堆積位置の違いに明確に現れている。しかし、 $\theta=60^\circ$ は u_1 が本実験時の砂の流動開始風速である 6.2 m/s を超えている

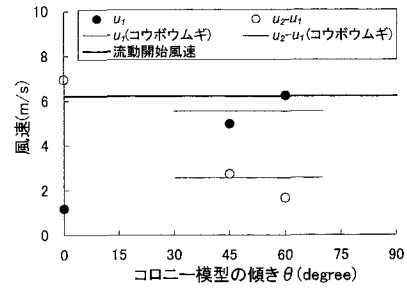


図-8 傾斜角と透過風速 u_1 と側方風速 u_2 の関係

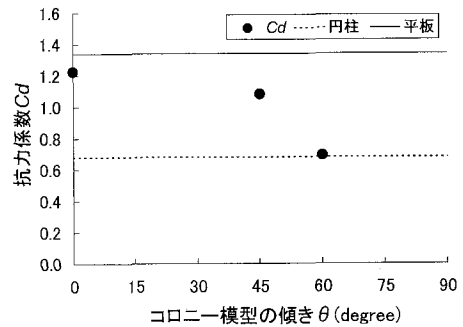


図-9 コロニー模型の傾斜角と抗力係数の関係

ことからコロニー模型背後に堆積した砂が再移動するため、 $\theta=45^\circ$ より堆砂量が若干少なくなったと考えられる (図-5)。実物のコウボウムギの場合、堆砂量は異なるものの、透過風速 (図-8) と砂面形状 (図-5) において $\theta=45^\circ$ と類似した傾向を示した。

(4) 抗力係数

図-9 に傾きを変えた場合の抗力測定結果を示す。比較のため代表直径 D_c が同じである円柱 (点線) と、幅が D_c である平板 (実線) についても実験を行った。通常、境界層の影響を受けない場合の円柱の C_d は 1 程度であるが、本実験においては境界層影響下の Okamoto (1981) の実験値 ($C_d=0.698$) と類似した値 ($C_d=0.68$) となった。これは円柱周底部において、逆圧力勾配により 3 次元的な剝離が生じ円柱表面において抗力を受ける有効面積が減るため抗力が小さくなると考えられる。空隙がありかつ外周直径 D_c が等しいコロニー模型の抗力係数 C_d の値は、傾き $\theta=0^\circ$ の時に 1.2 と空隙がない円柱の場合よりも大きくなった。円柱の場合、生じた馬蹄渦が円柱に沿って流れるのに対し、空隙をもつ円柱群 (コロニー模型) である場合、透過流となって模型内部に入ってくるため、内部でも抵抗が働きトータルとしての抗力が大きくなるものと考えられる。しかし、底面上の空隙のない平板の場合 ($C_d=1.34$) ほどは大きな抵抗とはならなかった。また、角度について見ると、角度が大きくなれ

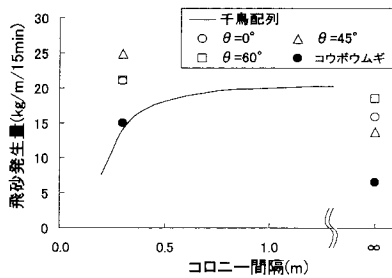


図-10 コロニー間隔・配列による飛砂発生量の比較

ば、抗力係数は小さくなるという結果を得た。これは、角度 θ が大きくなるほどコロニー模型は流線型に近づくため、コロニー模型前面部の抗力が小さくなるためであると考えられる。

(5) 飛砂式の比較

図-10 に単一と2つの場合の飛砂発生量を栗山ら(2000)による飛砂量推定式、

$$q_e = R_{bold}^2 K (\rho_a g) (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \dots\dots (2)$$

による値と比較したものを示す。ここに、 ρ_a は空気密度 (kg/m^3)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 u_* は摩擦速度 (m/s)、 u_{*c} は移動開始摩擦速度 (m/s)、 R_{bold} は裸地率 (= (海浜面積 - 粗度の底面への投影面積) / 海浜面積)、 K は実験定数である。実験定数 K は、本実験装置において粗度無しの状態における飛砂発生量を河村 (1951) の式

$$q = K (\rho_a g) (u_* + u_{*c})^2 (u_* - u_{*c}) \dots\dots (3)$$

に適用し、 $K=0.5$ とした。なお、図-10 における直線式を求める際、 R_{bold} は一様の千鳥配列を想定して計算した。

0.3 m 間隔実験の結果は単体の場合 (間隔は無量大となる) や千鳥配列の場合よりも飛砂量が増加する結果となった。図-4 に示したように、回り込む流れにより飛砂を発生させる $\theta=0^\circ$ の場合は2つのコロニーが一体化する傾向が強く周辺部の飛砂を増大させたが、後方のコロニー周辺において飛砂発生が減少した。一方、透過流が支配的となる $\theta=45^\circ$ の場合は後方剥離域が狭くコロニーモデル近傍から風速の回復が始まり後方コロニーにおいても飛砂が発生したため、多くの飛砂が発生したと考えられる。

4. 考 察

図-9 に示したように、コロニー模型の傾斜は模型に働く抗力係数を大きく変化させる。角度が大きくなればなるほど抗力が減少し透過風速は大きくなる。それが、透過風速と側方風速の差を減少させる (図-8)。空隙のない円柱背後の堆積形状 (Raudkivi, 1986) は $\theta=0^\circ$ の場合と類似しているものの、 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 、実物の場合、先に述べた角度の変化に伴う速度差の減少は円柱背後と異なる堆積傾向を示す原因となった (図-3, 4, 5)。すな

わち、 $\theta=0^\circ$ の場合は、模型直後に形成される後流渦により直後では砂が運ばれ側方流との風速差により運ばれてきた砂が再付着点下流側に堆積するのにに対し、 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ 、実物の場合は、透過流によって運ばれてきた砂が模型内・背後の風速減少によって堆積したと考えることが出来る。こうした傾斜による図-8の風速差は、模型間の間隔を0.3 mとした場合においても差をもたらした。 $\theta=0^\circ$ の場合は再付着点内部に後ろの模型が入ったため、2つの粗度が一体化した。一方、 $\theta=45^\circ$ 、実物の場合は再付着点より下流側にあたり風速の回復域にあたるため一体化せず、単一の場合の現象を2つ合わせたような堆積形状が確認された。図-10 に示す千鳥配列の式、単一模型および0.3 m 間隔模型の場合の飛砂量の相違は、粗い粗度領域の飛砂量は単なる裸地率ではなく分布を考慮する必要があることを示しており、今後更なる検討が必要と考えられる。

5. ま と め

本研究により、コウボウムギ群落周辺の飛砂現象には群落の傾きによってもたらされる透過風速と側方風速の変化が大きく関わっており、風速分布、砂の堆積位置から $\theta=45^\circ$ の場合が実際のコウボウムギ群落に最も似た傾向にあることがわかった。また、コウボウムギの群落周辺部等まばらな粗度空間で近接した2群落周辺においては、一様に広がる場合と同じコロニー間隔でも、飛砂発生量は多くなる場合があるため、裸地率だけではなく粗度の配置について更なる検討が必要と考えられる。

参 考 文 献

- 有働恵子・武若 聡・西村仁嗣 (2003): 植生領域の飛砂と風場に関する実験的研究, 海工論文集, 第50巻, pp. 616-620.
- 河村龍馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, Vol. 5, No. 3-4, pp. 95-112.
- 栗山喜昭・中島 剛・上堂園孝一・望月徳雄 (2001): 後浜から砂丘前面にかけての植生が地形変化に及ぼす影響に関する現地観測と植生を考慮した飛砂量の数値計算, 港研報告, 第40巻第1号, pp. 47-80.
- 城野裕介・田中規夫・渡辺 肇 (2003): 成長動態解析による海浜植物コウボウムギの適正移植間隔の評価, 日本緑化学会誌, Vol. 29, pp. 27-32.
- 田中規夫・渡辺 肇・谷本勝利・小松原肇 (2002): 海浜植生コウボウムギの生長および平面拡大解析, 海工論文集, 第49巻, pp. 506-510.
- 延原 肇 (1960): 海浜におけるコウボウムギの生育, 砂丘研究 6(2), pp. 9-19.
- Dexin, G, Z. Yushu and Z. Tingyao (2003): A wind-tunnel study of windbreak drag, Agricultural and Forest Meteorology 118, pp. 75-84.
- Musik, H. B., S. M. Trujillo and C. R. Truman. (1996): Wind-tunnel modeling of the influence of vegetation structure on salutation threshold, Earth Surface Processes and Landforms 21, pp. 589-605.
- Okamoto, S. (1981): Turbulent shear flow behind hemisphere-cylinder placed on a ground plane, Turbulent Shear Flows, Vol. 3, pp. 171-185.
- Raudkivi, A. J. (1986): Functional trends of scour at bridge piers. Journal of hydraulic engineering, Vol. 112, No. 1, pp. 1-13.