

人工砂丘の防風効果が斜めからの風に対して低下するメカニズム

萩野裕章^{1*}・野口宏典²・島田和則²・坂本知己²

The Mechanism explaining why the low wind speed area is reduced in sized when wind flows diagonally over the ridgeline of an artificial sand dune

Hiroaki Hagino^{1*}, Hironori Noguchi², Kazunori Shimada² and Tomoki Sakamoto²

Abstract: There are references in the literature that have identified the extent of the area protected from wind by artificial sand dunes. However, most these studies examined cases in which the wind flow direction was only perpendicular to the ridgelines of dunes. Given this background, a wind tunnel experiment was conducted in order to determine the area protected from the wind by an artificial sand dune when wind directions were diagonal to the ridgeline. The size of the area protected from the wind on the leeward side of the dune was smaller as diagonally as to the ridgeline of the dune. When the wind direction was perpendicular to the ridgeline of the dune, the slope of the surface measured along the wind direction was at a maximum. Two dimensional analysis of the wind direction components on the dune (profile view) revealed that the wind which flowed upward along the windward slope of the dune surface separated off at the ridge, resulting in a low wind speed area leeward of the dune. In contrast, when the wind direction was diagonal to the ridgeline of the dune, the slope of the surface measured along the wind direction was smaller than that in the perpendicular case. As a result, the wind was less likely to separate off at the ridge of the dune than it was in the perpendicular case, but flowed downward along the leeside slope of the dune with no reduction in wind speed, which weakened the formation of area low wind speed area on the leeside of the dune.

Key Words: artificial sand dune, wind tunnel experiment, wind direction

1 はじめに

人工砂丘の防風効果は古くから知られ、海岸林の植栽と同時に砂丘造成も積極的に行われてきた。しかし、その防風効果についての知見はまだ十分ではない。樫山ら (1971) は、砂丘造成の前後に現地観測を行った結果、内陸側の海岸林に対して砂丘が大きな防風効果を発揮することを明らかにした。堀田ら (2000) は風洞実験で、砂丘の斜面勾配や丘頂の幅によって風速分布や風の流れ方が変わることを明らかにした。ただし、これらは砂丘に対して風向が直交する場合を対象に調べていた。大儀ら (2000) は盛土を対象に、風向が異なる場合の風速比分布を風洞実験で調べた。風向が斜めになると盛土による防風効果が小さくなる結果を得た。また著者らも砂丘に対する風向が斜めになると防風効果が小さくなることを風洞実験の結果 (萩野ら, 2010) から報告した。しかし、いずれもその現象のメカニズムまでは述べていない。

近年は数値シミュレーション技術が進歩し、様々な風向での砂丘周囲の3次元空間における風の挙動を予測できるようになった。著者らも数値シミュレーションは防風効果の推定や流れのメカニズムを理解するのに有効な手法と考える。しかし、その計算結果に対して一定の信頼性を得るには、境界条件の設定や計算結果の検証データとして、現地観測や風洞実験のデータを取得することが必要となる。萩野ら (2010) の風洞実験では、風速の3次元方向成分を測定できる風速計を使用して砂丘周囲の風速分布を測定した。本研究ではその実験データを用いて、人工砂丘に対する風向きと風の流れ方の関係を明らかにし、防風効果が風向きによって変化するメカニズムの考察を行ったので報告する。

2 実験施設と方法

2.1 測定対象と風速計

防風範囲が形成されるメカニズムを分析するためには、風の流れる方向を把握することが有効である。そこで本実験では風速の方向成分 (3次元方向に分解した風速 u , v , w) を測定し「流れの可視化」を行った。以後本研究では、風の流れる方向と風速の分布状況を合わせて「風況」と呼ぶ。

本実験では風速成分を砂丘周囲で適当な間隔を

¹ 独立行政法人森林総合研究所九州支所
Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products
Research Institute, 4-11-16 Kurokami, Kumamoto,
Kumamoto 860-0862 Japan

² 独立行政法人森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute, 1
Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687 Japan

*Corresponding author: hagin @ ffpr.affrc.go.jp

として測定し、風況を明らかにした。風速成分の測定には3次元流速装置(米国 TSI 社製: IFA300)を用いた。以後この装置を便宜上単に風速計と呼ぶ。測定原理は一般的な熱線風速計と同じであるが、風速の空間3次元方向成分が同時に測定できる。

2.2 風洞装置の概要

実験には(独)森林総合研究所のエッフェル型風洞装置(吸込み式)を使用した。測定洞の大きさは、幅 1.2m、高さ 1.6m、長さ 10m である。風速計を測定洞内のトラバース装置に取り付けることで、風洞内の任意地点の風速が測定できる。

2.3 砂丘模型と風洞内の配置

砂丘の模型形状は、現在も飛砂対策が続けられている茨城県波崎海岸の砂丘形状を採用し、模型は発泡スチロール等で作成した。波崎海岸では砂丘高さ(h:法尻からの比高)は、場所により異なるが平均的な 5m とし、汀線側・内陸側の斜面勾配は 1:1.7、天端幅は 2.2m である。模型の大きさは、風洞測定洞の大きさを考慮して縮尺を 1/40 にした。現実の砂丘高さ 5m に対応する模型の高さは 125mm になる。

また砂丘に対し斜め方向の風を当てるために、砂丘模型の配置を風洞内で回転させた。実施した風向きは、既往研究と同様の 90°(砂丘に直交)の他、67.5°、45°、22.5°の計 4 通りである。模型の配置は風洞の主流方向に対して、砂丘の走行方向(以後:沿岸方向)が上述の角度で交わるようにした(図 1)。

なお本研究では、風洞の主流方向を X 軸、水平面上で X 軸に直交する軸を Y 軸とし、X、Y 軸に直交する軸を Z 軸とする。風速方向成分 u , v , w は X, Y, Z の方向と一致する。

2.4 風速測定点

砂丘模型が風洞内で占める空間領域は風向毎に変わるため、測定点は風向別に設定した。ただし何れの風向でも丘頂から主流方向の風下側へ 8h 程度までの領域は、主流方向にも沿岸方向にも 0.8h 間隔の格子状に設定し、それ以遠は粗な間隔に設けた。Z 方向には、各測定点の床面または砂丘模型面から 0.2h, 0.4h, 1h, 2h (現地での高さ 1m, 2m, 5m, 10m に相当)の 4 高度を基本に設定した。ただし 90°のみ沿岸方向は 2.4h 間隔に、高さ方向は 3h まで拡大した。風洞の幅は 1.2m で 10h 弱に相当するが、風速計を移動させるトラバースの Y 軸方向可動範囲は 6h ほどであり、測定範囲も同じ範囲に限定される(図 2)。

風速計の形状が L 字型のため(図 3)、特に砂丘風上側斜面の近傍は測定が困難であった。センサーが模型に接触する危険を回避するため、風上側斜面については砂丘近傍の測定を省いた。

2.5 基準風速

風洞風速は、砂丘堤体の主流方向にも沿岸方向にも中心の位置(X, Y=0h)から 17.6h 風上側で、床面上 0.2h の位置に定めた基準点において、約 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ に設定した。この風速は、風洞実験で一般的に用いられる根本の相似則(根本, 1967)を表す式(1)により、現地で約 $10.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ に相当する。

$$\frac{U_m}{U_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 U は代表風速、 L は代表長さ、 m は風洞を、 p は現地を意味する。

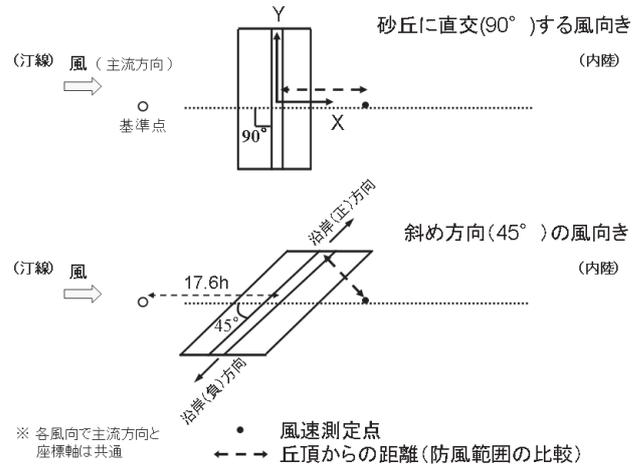


図 1: 風向きと模型配置の関係

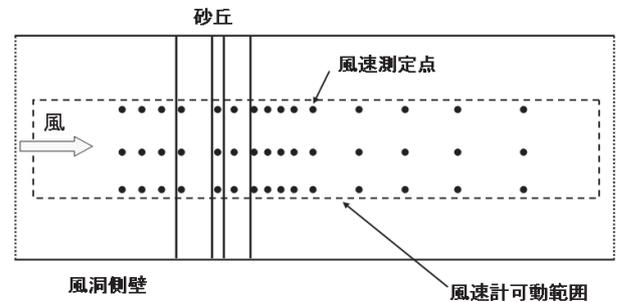


図 2: 風速測定点の配置(風向 90° のとき)

2.6 防風効果の比較

風向毎の防風範囲(図 1: 丘頂からの距離)を比較するため、風洞中央の Y=0h、高さ 0.2h の風速比分布データを用いる。Y=0h の位置を選んだのは、風洞側壁の影響を避けるためであり、高さ 0.2h (最下層)は、飛砂や堆砂垣への影響を検討するのに適当な高さである。

2.7 用語の定義

以降の結果説明に使用する用語等を次のように説明・定義する。

- ・ 平面、断面のことをそれぞれが関係する座標軸を用いて X-Y 平面、X-Z 断面と呼ぶ。

- X-Y 平面, X-Z 断面では, 共に長さ h と高さ h を砂丘高さ h の倍数で表す.
- 本研究の「減速範囲」は, 防風効果が認められる領域の丘頂から主流方向に沿った距離とした. また「防風範囲」は各風向での比較のため, 図 1 に示す丘頂からの距離とした.
- 砂丘に沿った方向を「沿岸方向」と呼び, 沿岸方向のうち Y 軸負側を「沿岸負方向」, Y 軸正側を「沿岸正方向」と定義する (図 1, 2).

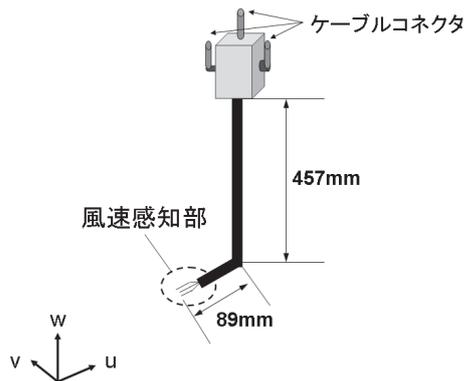


図 3: 風速計プローブの概観

3 結果

各測定点の風速値から基準点との風速比を求め, その風速比分布を基に平面・断面の風速比等値線図 (以下, 等風速線図) を作図した. 次に風況を理解するため, 風速方向成分を用いて矢羽を描いた. 矢羽の向きは風速方向成分を合成して表し, 矢羽の大きさは合成した風速値に比例する. これを風速ベクトル図とする. なお等風速線図の風速比は, 平面・断面共に風速の 3 次元方向成分を合成した値だが, 風速ベクトル図は X-Y 平面図の場合は風速成分 u , v を, X-Z 断面図の場合は同じく u , w の各 2 成分を用いた.

3.1 X-Y 平面の風況

床面・砂丘面から $0.2h$ 高さの測定値を用いて, 等風速線図および風速ベクトル図を X-Y 平面に表した (図 4). 何れの風向でも砂丘を越えると風況は大きく変化した. 砂丘の堤体風下側で減速域 (ここでは面積) が広がるが, その大きさは風向によって変わった. 斜めの風するとき, 沿岸方向に沿った流れが出現した. 以下風向毎の特徴を示す.

3.1.1 風向 90°

堤体風下側の減速範囲は, 風速比 0.2 以下が $8h$ まで拡がり, 0.4 以下は $10h$ まで, 0.6 以下はおおよそ $12h$ まで拡がった (図 4.a). 沿岸方向で減速範囲の違いはあるが, 砂丘から離れるにしたがって風速比は高くなり, やがて基準点の風速に戻った. 風速ベクトル図から風速比 0.2 以下の減速域は, 風の向きが定まっていなかった.

3.1.2 風向 67.5°

堤体風下側の減速範囲は, 沿岸正方向で大きく異なった (図 4.b). $Y=-2.4h$ 上の堤体風下側は風速比 0.8 以下の減速範囲が $3.7h$ ほどしかなく, それ以上は基準点の風速値に戻った. 減速範囲が狭く風速比もあまり下がらなかった. しかし砂丘の沿岸方向に沿って見ると, 沿岸正方向ほど等風速線の間隔が広がり減速範囲が広がった. ただし $Y=2.4h$ 上の風下側の減速範囲でも, 風向 90° の結果に比べると狭く, 風速比 0.2 以下の範囲は風向 90° で $8.2h$ あったが, 風向 67.5° では $5.9h$ になった.

風速ベクトル図には, 沿岸正方向に拡大した減速域に沿う流れが出現した (図 4.b).

丘頂の各測定点の風向と風速比も, 沿岸方向で大きく異なった. $Y=-2.4h$ 上の丘頂は, 風速比が 1.7 と非常に大きかった. しかし $Y=0h$ では 0.35 と小さく, $Y=2.4h$ では 0.92 と変動が激しかった. 大きな風速比を記録した測定点では, 風速成分 u の大きさに加え, 風速成分 v も大きなマイナス値を測定した. ここでいう風速成分 v のマイナス値や風速比のマイナスは, 風の流れる向きが Y 軸の負側に向いたことを意味する. そのため丘頂の矢羽は, Y 軸負側に傾いた. 丘頂測定点の風速成分 v は, 風速比 $-0.13 \sim -0.46$ で分布し, 沿岸負方向側でその絶対値が大きい傾向であった.

3.1.3 風向 45°

等風速線図から見た減速範囲の分布は風向 67.5° の場合と似ているが, その減速割合と減速範囲はともに小さくなった (図 4.c). $Y=-2.4h$ 上の堤体風下側は, 法尻付近で若干風速比は落ちたが, 風速比 0.4 までは減速していない. 沿岸正方向に移ると $Y=0h$ 付近から風速比 0.4 以下の領域が現れて, 減速域が主流方向に拡大した. しかしその範囲は風向 67.5° の場合より狭くなった. 堤体風下斜面と法尻付近に, 堤体に沿った沿岸方向の流れが現れた. 丘頂の風速比は $1.27 \sim 1.38$ に分布し, 沿岸方向での変動は小さくなった. 丘頂の風速成分 v も風速比 $-0.33 \sim -0.37$ に分布して風向 67.5° のときより均等になった.

3.1.4 風向 22.5°

堤体風下側で風速比 0.9 以下の領域が無くなった (図 4.d). 減速範囲はほぼ消滅したといえる. 堤体風下側の法尻近傍では, 堤体に沿った沿岸方向の流れが顕著になった. この流れは堤体風下側法尻から主流方向に $3 \sim 4h$ ほどの幅で存在し, 堤体から離れるほどその沿岸方向への偏向成分は弱まった. 丘頂の風速比は $1.04 \sim 1.23$ に分布し, 風速の加速は小さくなった. 丘頂の風速成分 v も風速比 $-0.20 \sim -0.26$ に分布して, 沿岸負方向への偏向も小さくなった.

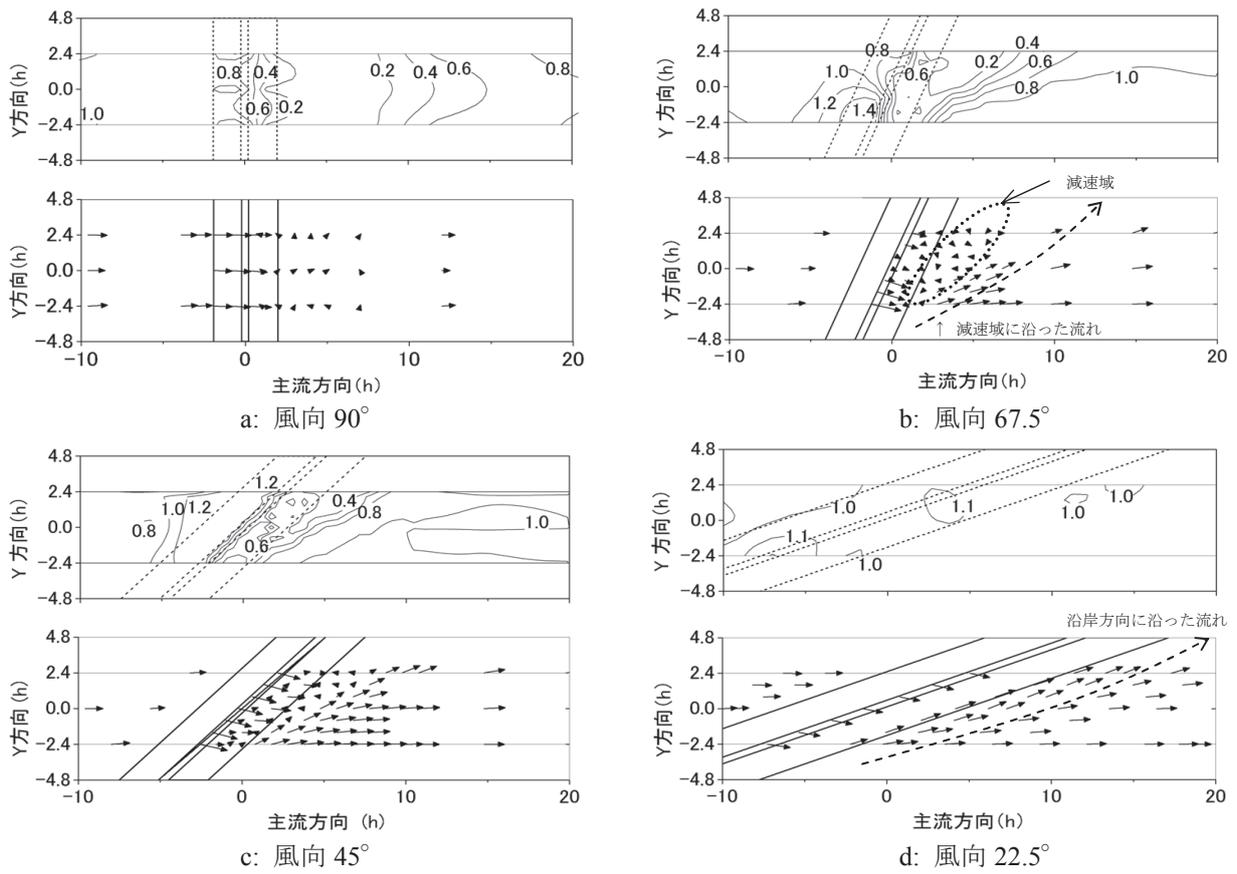


図4 X-Y 平面の風況

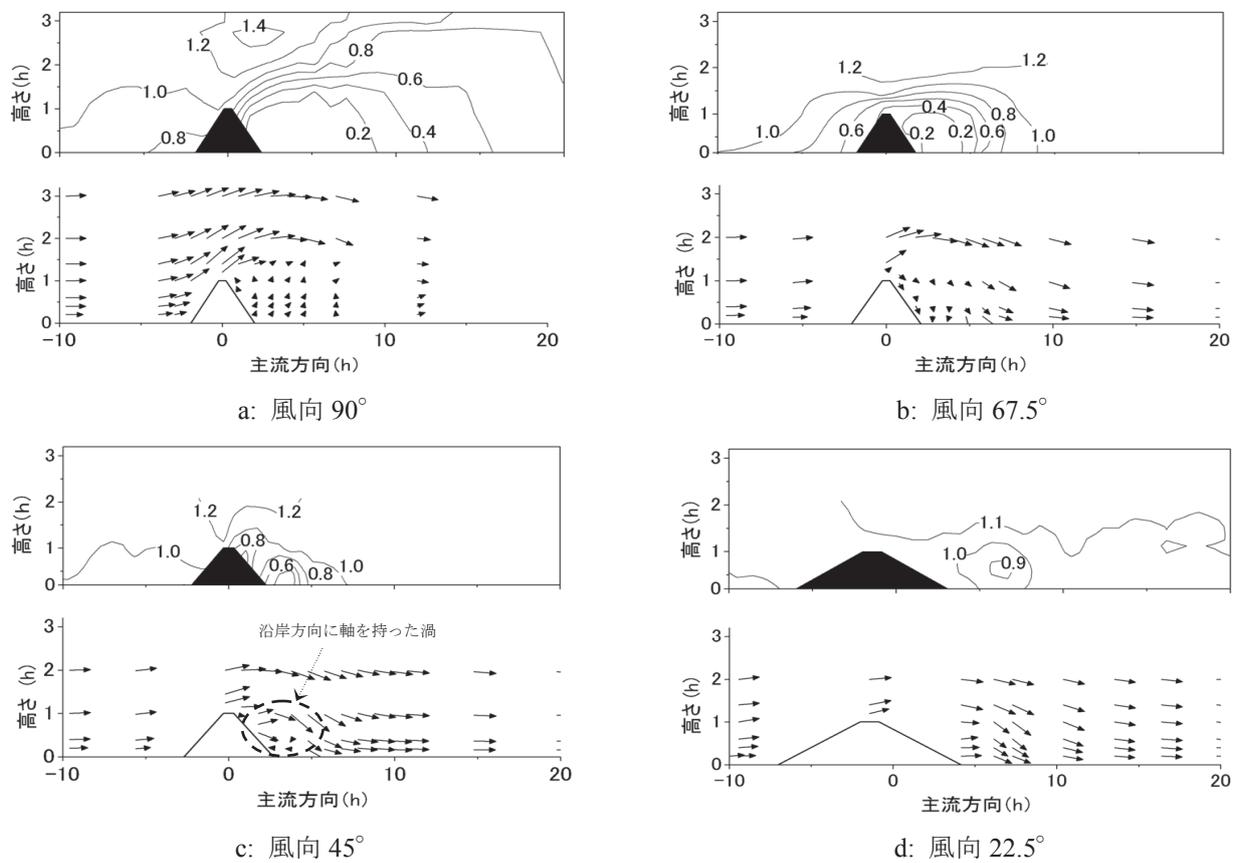


図5 X-Z 断面の風況

3.2 X-Z 断面の風況

前節の結果から、堤体風下側の風況は沿岸方向で大きく変わることが分かった。ここでは、風洞側壁の影響が最も少ない風洞の中央 ($Y=0h$) で測定した風速方向成分を用いて、等風速線図・風速ベクトル図を作成した (図 5)。

3.2.1 風向 90°

砂丘の丘頂上方に加速域が生じた。一方、堤体の風下側には大きな減速域が現れた (図 5.a)。減速域の高さは砂丘高さ以上に達した。また丘頂付近は等風速線が密なことから風速の変化が大きい領域である。風速ベクトル図から、丘頂近傍で風速成分 w が大きくなり、風が丘頂の上方へ吹き上がったことが示されている。吹き上がりの影響は高さ $2h$ には及んでいるが、 $3h$ では僅かになった。丘頂で風が上方へ吹き上がるので堤体風下側には減速域が生じた。

3.2.2 風向 67.5°

等風速線図を風向 90° と比較すると、堤体風下側の減速域が小さくなった。一方、丘頂上方の加速域は風速比が下がり、風速比 1.4 以上の領域はなくなった (図 5.b)。風速ベクトル図を見ると風向 90° と同様に丘頂での吹き上がりが見られ、その影響は高さ $2h$ にも達しているが、堤体風下側には吹き降りる風が現れた。

3.2.3 風向 45°

等風速線図の堤体風下側に風速比 0.2 以下の領域はなくなり、風向 67.5° に比べて減速域がさらに小さくなった。風速ベクトル図から丘頂での吹き上がり角度も小さくなった。また堤体風下側の法尻直上に、沿岸方向に軸を持った渦が確認できた (図 5.c)。

3.2.4 風向 22.5°

風速比 0.8 以下の領域がなくなった (図 5.d)。風速を減速させた割合が 1~2 割未満で、その範囲も小さく他の風向と比べて防風効果は著しく低下した。風速ベクトル図からも丘頂での吹き上がりは小さく、堤体風下側の矢羽は大きく高い風速が維持されている。

3.3 風向別の防風効果の比較

風向別の防風効果を比較するため、風速比 0.5 以下の防風範囲を測定した (表 1)。風向 90° のとき防風範囲は最大になり $13.5h$ で、斜めになるほど小さく、風向 22.5° では防風範囲が認められなかった。

表 1: 風速比 0.5 以下の範囲

風向 ($^\circ$)	90	67.5	45	22.5
範囲 (h)	13.5	5.0	1.6*	0

※風向 45° は 2 つに別れた範囲を足し合わせている。

4 考察

風が斜めから吹くと砂丘による防風効果が低下する結果を得た。著者らはこの現象について、砂丘形状は同じでも風向が変われば、主流方向に沿った堤体の斜面勾配が変化することに着目した。勾配の変化が風況に大きな影響を与えたと考える。

風向によって風の進行経路上の斜面勾配が変わることと、それに応じて風況が変化する仕組みを考察する。

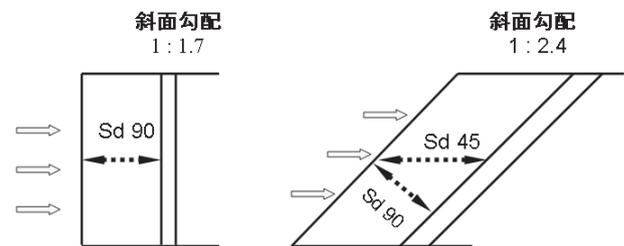
4.1 斜面勾配と風況変化のメカニズム

本節では考察を単純化するため、風は砂丘上を主流方向に沿って X-Z 断面内で吹くと仮定する。風が砂丘に直交する場合の堤体風上側の斜面長 $Sd90$ と、斜行する風向 45° の場合の斜面長 $Sd45$ を比較すると、 $Sd45$ の方が長い (図 6)。砂丘の高さ H は等しいため、風が吹送する斜面長が最短になるのは風向 90° のときである。そのとき斜面勾配は最も大きく 1:1.7 で、風向 45° では 1:2.4、風向 22.5° では 1:4.4 になる。

風は砂丘の風上側斜面に接すると斜面に沿って吹き上がる。急勾配の場合は丘頂天端部で斜面から“急”に水平面が変わる。このため、風上側斜面に沿って吹く風は、丘頂から吹き上がって堤体から離れていく。その結果、堤体の風下側には勢いある風が届かずに減速域が形成される。丘頂でいわゆる「流れの剥離」が起きる (図 7)。

一方緩勾配の場合、風上斜面から丘頂天端部への接続が“緩やか”になる。斜面勾配が小さいため風上側斜面の風は吹き上がる角度が小さく、堤体から上空へ離れずに風下側へ流れる。そのため堤体風下側では減速域が形成されにくい。

以上のことから、斜面勾配の緩急により丘頂での吹き上がり (流れの剥離) が消長し、そのことが砂丘風下側の防風効果に影響を与えたと考えられる。



$$Sd 90 < Sd 45$$

図 6: 風向きと斜面長の関係

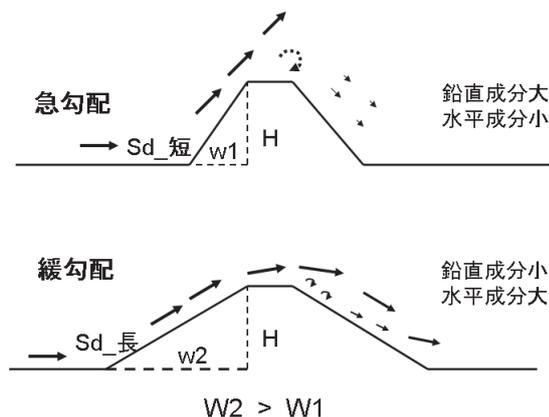


図 7: 勾配の緩急と風況の違い

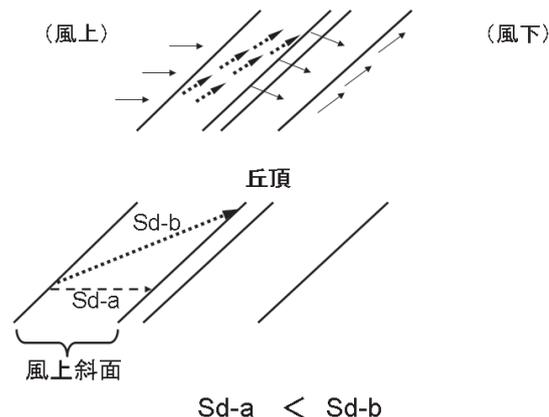


図 8: 風上斜面の風の進行経路 (推測)

4.2 砂丘斜面を吹く風の進行経路について

堀田ら (2000) は風洞実験で、堤体風上側斜面勾配を変えた場合 (風下側斜面勾配は 1:1 に固定) の風速比分布を明らかにした。これは、著者らの風向 90° の実験にあたる。その結果によると、風上側の斜面勾配が 1:1 と 1:5 の場合、堤体風下側の風速比 0.4 以下の範囲がそれぞれ 12h と 10h であった。斜面勾配が緩くなることで防風範囲が 2h 小さくなったことを示す。

著者らの実験では、X-Z 断面上の斜面勾配が 1:1.7 (風向 90°) と 1:4.4 (風向 22.5°) のとき、堤体風下側の風速比 0.5 以下の範囲はそれぞれ 13.5h と 0h である (表 1)。

著者らの風向 90° と堀田らの風上側斜面勾配 1:1 の結果は、ほぼ同程度の防風効果である。しかし風向 22.5° のときは X-Z 断面上の風上側斜面勾配は同程度にも関わらず、防風効果には大きな差が生じた。この理由は、砂丘に斜め方向から接した風は、風上側斜面を斜行して丘頂へ吹いたためと推測できる。萩野ら (2008) が海岸の砂丘上で、風紋の向きから風の流れ方向を推定した例がある。それによると、風が砂丘に対して斜め方向から吹いた後の風上側斜面では、砂丘に沿う風の方向成分が見られた。今回の実験でも、風上斜面を吹いた風の進行経路は、主流方向に沿った斜面長 Sd-a ではなく、Sd-b のような斜行する長い経路であったと推測する。そのため風の進行経路はより緩勾配になり、砂丘風上側の風速を維持したまま風下側へ流れたと考える (図 8)。

また堀田らの実験では、風下側の勾配が 1:1 と比較的急勾配に固定されてあった。このことも防風範囲が維持される要因であった可能性がある。

なお風向が斜めのとき、丘頂の風速ベクトルが沿岸負方向へ向いたことと、風向 67.5° のとき丘頂の風速比が沿岸方向で大きく異なった理由ならびにそのことが風下側の風況に与えた影響については、今回の実験だけでは不明であった。

5 おわりに

本研究では風が斜めから吹くときに、防風効果が小さくなるメカニズムを示した。堀田ら (2000) の実験結果と比較することで、風が斜めから吹く場合の防風効果は、X-Z 断面上の斜面勾配だけでは推定できないことが示唆された。次の課題として、以下の項目が考えられる。

- ① 風上側斜面での風況把握
 - ② 斜めからの風するとき、丘頂上の風が Y 軸負側に傾く現象の解明
 - ③ 風下側の斜面勾配が防風効果に与える影響
- 以上については、今後数値シミュレーションで確認したい。

最後に、茨城県鹿行農林事務所林業振興課の方々には、波崎海岸の砂丘形状の情報を提供していただいた。また匿名査読者の意見は、本論の内容を改善する上で必要なものであった。以上の方々へ、心よりお礼申し上げます。

引用文献

- [1] 萩野裕章・野口宏典・坂本知己 (2008) : 風食が進んだ人工砂丘上の飛砂集中過程, 日本海岸林学会誌, 7(2), 27-32
- [2] 萩野裕章・野口宏典・島田和則・坂本知己 (2010) : 風洞実験による人工砂丘防風効果範囲の推定, 九州森林研究, No.63, 134-136
- [3] 堀田新太郎・畑中勝守・田中寛好・小泉圭右・大塚香織 (2000) : 人工砂丘周辺の風の場合による砂丘形状決定に関する研究, 砂防学会誌, 53(2), 22-33
- [4] 樫山徳治・松岡広雄・佐伯正夫 (1971) : 人工砂丘の風速減少作用の一例, 日林講, 82, 269-271
- [5] 根本茂 (1967) : 局地風を対象とした風洞模型実験の相似則, 農業気象 22(3), 129-136
- [6] 大儀健一・佐藤弘史 (2000) : 台形周りの風況特性に関する検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会, I-B14

[受付 平成 22 年 9 月 10 日, 受理 平成 22 年 12 月 5 日]