

風食が進んだ人工砂丘上の飛砂集中過程

萩野裕章¹・野口宏典¹・坂本知己¹

The funneling process of blown sand on a wind-eroded artificial dune

Hiroaki Hagino¹ · Hironori Noguchi¹ and Tomoki Sakamoto¹

Abstract: Due to the wind-breaking nature of artificial dunes, wind is generally calm leeward (inland) of the dune and transports only a small amount of sand. However, when gaps form naturally by wind-erosion in the sand dunes, a considerable amount of blown sand is transported through the gaps to the leeward side. Damage to many coastal forest areas has often been found to the leeward side of dune gaps. The exact process of how blown sand is funneled through dune gaps is not known. To investigate this process, the direction of ripple marks on the beach and the flow patterns of tracers were recorded. The tracers were released along a line parallel to the ridgeline of the dune. This line was located 30m toward the shoreline from the ridgeline of the dune. Data analysis suggests two results. 1) When the wind blew diagonally from the coast toward the artificial dune, blown sand moved in the along-wind direction over the beach while the sand was not on the sand dune. However, on the dune, some of the sand continued to move up the dune slope in the along-wind direction, while some of the sand changed direction and moved along the sand dune in the alongshore direction. Much of the sand that moved along the dune passed through the gap. 2) The release points of the tracers that passed through the gap extended 35m along the line at various points (30m away from ridgeline) in the alongshore direction.

1 はじめに

人工砂丘は冬季の季節風等による強風や飛砂の影響を和らげることで、海岸林の生育可能な環境を創出する。しかし、著者らは茨城県波崎海岸で、人工砂丘内陸側の保全対象地にありながら、砂丘に凹型地形(風溝)が生じている所では、海岸林が飛砂で埋没している現場を複数見てきた。それらの飛砂害の原因は、砂丘の砂が風食によって海岸林まで運ばれたことと、その後が生じた風溝に多量の飛砂が通過して内陸へ運ばれたことが考えられた。

人工砂丘の風溝が飛砂の集中を招く危険性については、過去にも飯塚(1964)や末(1968)が指摘しており、林野庁監修の治山技術基準解説(1992)でも、人工砂丘の構造指針として「砂丘の頂部は原則として水平とし、(省略)頂部の固定を図る」と記述されている。これらから、人工砂丘は凹凸が無い整った形であることが飛砂害の抑止に望ましいといえる。しかしながら、砂丘の風溝に集中する飛砂の実態を測定から明らかにした例はほとんど無い。風溝の通過飛砂量が砂丘頂部の通過飛砂量より多かつたとする萩野ら(2006)の現地測定の結果はあるが、風溝を通過する飛砂がどの範囲から集まり、どこから集中を始めるのかといった移動の過程までは明らかにしていない。そこで本研究では、砂丘風溝を通過する飛砂の集中過程を明らかにすることを目的として現地測定を実施し、後浜～人工砂丘の領域における飛砂の移動経路を推定した。

なお本研究では、砂丘の頂部にできた凹型地形の深さが砂丘の高さと同程度になったものを風溝と呼び、満潮時の汀線～人工砂丘までの砂浜を後浜と呼ぶことにする。

2 方法

2.1 測定対象地の概要

測定地は、茨城県波崎海岸の北端に近い風溝が生じた人工砂丘で、汀線と平行に砂丘が続く(図1)。測定地の状況は、汀線より約150mの後浜が広がり、次いで砂草に覆われた高さ4～5mの人工砂丘、さらに幅40～50mの砂草帯が続いて海岸林に至る(図2)。人工砂丘の風溝の幅は、汀線側の狭い所で1～2m、砂丘中程の丘頂ライン(砂丘頂部を沿岸方向に結んだ線)より内陸は7m程に広がる。従って風溝の幅は汀線側が狭い。砂草は測定を行った2007年4月時点で、後浜にはほとんど見られなかったが、人工砂丘の汀線側法面から内陸では地表面を覆うように存在した。砂草の高さは20～30cm程であった(図3)。

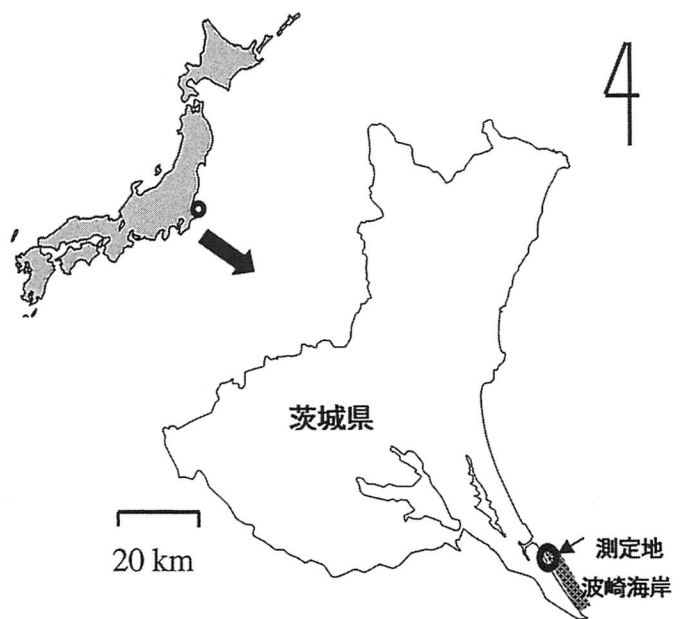


図1 波崎海岸の位置

¹ 独立行政法人森林総合研究所 気象害・防災林研究室
 Meteorological Forest Damage and Buffer Forest Lab.,
 Forestry and Forest Products Research Institute,
 Ibaraki 305-8687 Japan

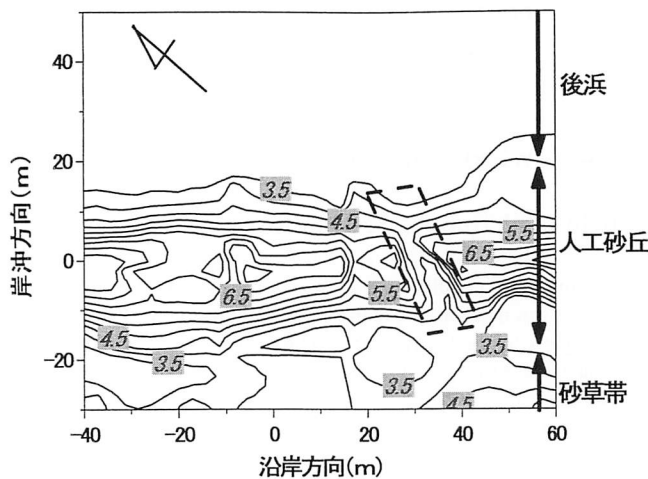


図2 測定地の地形

図内の数値は標高(m)、破線で囲んだ部分は風溝部



図3 測定対象地(後浜から内陸に向けて撮影)

写真の左側砂丘凹部が風溝

年間日最大風速(2006年)の風向頻度について、測定地最寄りのアメダスデータ(鹿嶋)を解析すると、北東と北北東の風が多く、2つの風向で年間の1/3余りを占めた(図4)。測定地の風は人工砂丘に対して、斜め方向から吹くことが多いと言える。

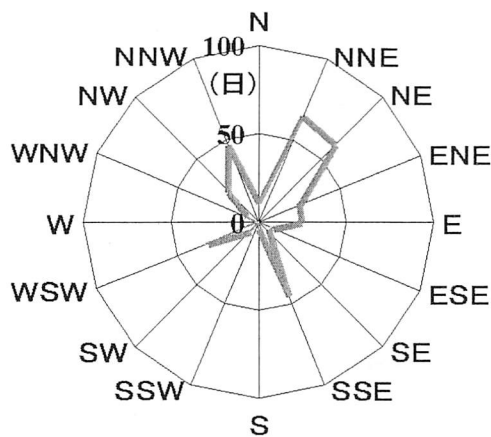


図4 2006年鹿嶋日最大風速の風向別頻度

2.2 測定方法

本研究では、測定対象地における飛砂の動きを把握するため、風紋の方位とトレーサーの移動経路および地表面上の飛砂量を測定した。

2.2.1 風紋の方位測定

飛砂の後浜～人工砂丘間における移動経路を把握するには、飛砂粒子を追跡して記録することが確実な方法である。しかし現実には微細な飛砂粒子を特定して追跡することは難しい。そこで飛砂が通過するとき地表面上にできる風紋に着目し、現地での観察から飛砂の移動方向は風紋の縞に直交するものと判断して、飛砂が移動した方向の推定に風紋の方位を利用した。風紋の方位測定点を後浜～人工砂丘の領域に設定することで、その範囲を通過した飛砂の移動経路がおおよそ推定できると考えた。

測定範囲は丘頂ラインから汀線方向30m、内陸方向20m、沿岸方向70mである。測定点の配置は、測定時の風向が北東を想定して、平面図上で平行四辺形になるよう設定した(図5)。測定点の沿岸方向間隔は5mである。

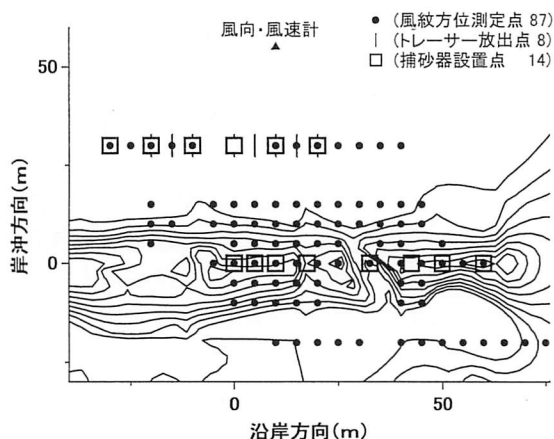


図5 風紋測定点、トレーサー放出点、捕砂器設置点

測定点のうち、砂丘法面の勾配が急で砂の堆積が無かった地点や砂草・ごみが地表を覆っていた場所は測定を省略した。

方位測定には、方位磁石と自作のT字型定規を用いた。定規の一辺(100cm)を風紋の縞に重ねると他の一辺が縞に直交するので、縞に直交する一辺の方位を磁石で読み取り、その場における飛砂の平均的な移動方向とした(図6)。なお本論文での方位は真北を0°として表し、磁気偏角を7°として後から補正した。

測定は2007年4月18日の9:25～12:13の間に行った。測定時の風速は小さく飛砂は発生していなかったため、強風が吹いていた前日17日16:00～17:15までの後浜上で記録した平均風向・風速(測定高さ1.8m)を参考にと、風向方位19.4°、風速9.1m/sであった。

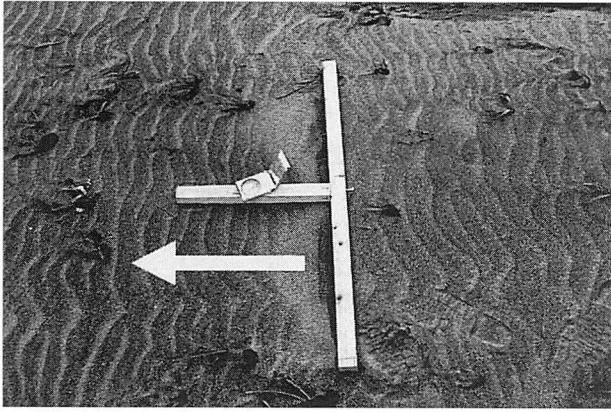


図 6 風紋方位測定の様子
矢印は飛砂の進行方向を示す

2.2.2 トレーサー移動経路の測定

風紋方位の測定結果から、平均的な飛砂移動経路の推定はできると考えるが、飛砂の移動方向に分岐があった場合、それぞれに進行する割合は把握できない。具体的には、人工砂丘に対して風が斜め方向から吹くとき、後浜上の飛砂移動方向も砂丘に対して斜めになるが、それらの飛砂が砂丘法面に達すると、その向きを維持して法面を斜めに登るものと、向きを変えて砂丘に沿って移動するものに分離すると予想される。その分離する割合を推定する手法として、著者らはトレーサーを放ち、その移動経路を記録することを試みた。このことで飛砂の移動方向に分岐があっても、それぞれに進んだトレーサー数を測定することで分岐する割合を推定できる。またトレーサー放出点を後浜上に複数設置してその飛跡を記録することで、風溝を通過するトレーサーの放出点がどのくらいの範囲にわたり、集合を始める場所がどのような所であるかを調べることができる。

トレーサー移動経路の測定は平成 19 年 4 月 19 日に行った。測定中の平均風向は方位 19.9° 、平均風速は 9.9m/s であった。トレーサー放出点は、丘頂から汀線側へ 30m 離れた後浜上の沿岸方向に(以後 30m ライン: 数値は丘頂からの距離を、正は汀線側、負は内陸側を表す)設定し、8 箇所での記録を得た。各放出点の名称をライン上の北側より順に No.2~No.10 とする (No.1 と No.5 は欠測)。移動経路の記録方法は、各放出点の地表付近からトレーサーを毎回 1 個ずつ放ち、トレーサーが移動する際に通過した最寄りの風紋測定点を通過位置とした。放出したトレーサーが風溝に進入又は砂丘を越えた時点あるいは砂丘法面の砂草に捕捉された時点で 1 回の測定を終えた。1 箇所の放出点から同じトレーサーを 10 回繰り返して放った。トレーサーは発砲スチロール製で、大きさが $1\text{cm}\times 2\text{cm}\times 0.7\text{cm}$ あり、重さは上空に舞い上がらないよう輪ゴムをくくりつけて調節し 0.4g にした。比重は約 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ である。

2.2.3 飛砂量の測定

飛砂量の測定を平成 19 年 4 月 19 日のトレーサー移動経路測定の間に行った。砂丘地形の影響が無い後浜の 30m ライン上と地形の影響を直接受ける丘頂ライン上の通過飛砂量を測定することにし、捕砂器を 30m ライン上で 10m 間隔 6 箇所、風溝を含めた丘頂ライン上に 8 箇所設置した(図 5)。捕砂器には坂本ら(2005)が開発した地表風食防止板を備える捕砂器を用いた。各測定点で捕砂器の飛砂取り込み口を飛砂が移動してくる方向に正対させた。飛砂量の測定時間は約 30 分間で終了した。その間の平均風向は方位 26.6° 、平均風速は 9.8m/s であった。捕捉した砂は実験室に持ち帰り室内で風乾状態にした後、重量を測定した。測定結果は単位時間・単位幅当たりの重量に換算した。

2.3 風向・風速の測定

風紋方位、トレーサー移動経路および飛砂量測定時の風向・風速データを得るため、三杯風速計と風向計(Lufft 社製、型式 LS-8368.01)を使用した。設置場所は砂丘地形の影響を避けるため、砂丘頂から汀線側に 55m 離れた地点を選び(図 5)、地表面の凹凸や砂草等の影響を避けるため地上 2.0m の高さ(4 月 17 日は 1.8m)にセンサーを設置した。風向・風速共に 5 分間毎の平均値をロガー(Lufft 社製、OPUS 200/200i)に記録した。

3 結果と考察

3.1 風紋方位

本研究では丘頂ラインと飛砂進行方向がなす角を交差角と定義する。この定義を用いると測定地において真北は丘頂ラインに 33° の角度で交わるため、真北から砂丘へ向かう飛砂の交差角は 33° になる。

後浜上 30m ライン 12 箇所の風紋測定点で得られた飛砂進行方向の交差角は $44^\circ\sim 64^\circ$ の範囲に分布して平均が 53° であった(図 7)。これは前日の平均風向が記録した丘頂ラインとの交差角 52.4° (風向方位 19.4°) とほぼ一致する。砂丘から離れた後浜上では、飛砂はその時の風向きに沿って移動することを示している。

しかし後浜上 15m ラインになると北側の 3 つの測定点は砂丘法面に達し、飛砂進行方向は砂丘に沿う(沿岸)方向に変化した。この理由は砂丘法面が風に対して障壁のように働き、それまでの進行方向が遮られ、流れやすい法面の沿岸方向へ進んだとみられる。10m ラインではどの測定点も法面上に位置することから、沿岸方向への偏向がさらに進んだ。5m ラインになると、交差角は 30m ラインとほぼ同じになった。これは法面の勾配が緩やかになったため、飛砂を沿岸方向へ偏向させる要因が小さくなったからだと考える。丘頂ラインでは進行方向が内陸側に振られ、交差角は直角に近づいた。

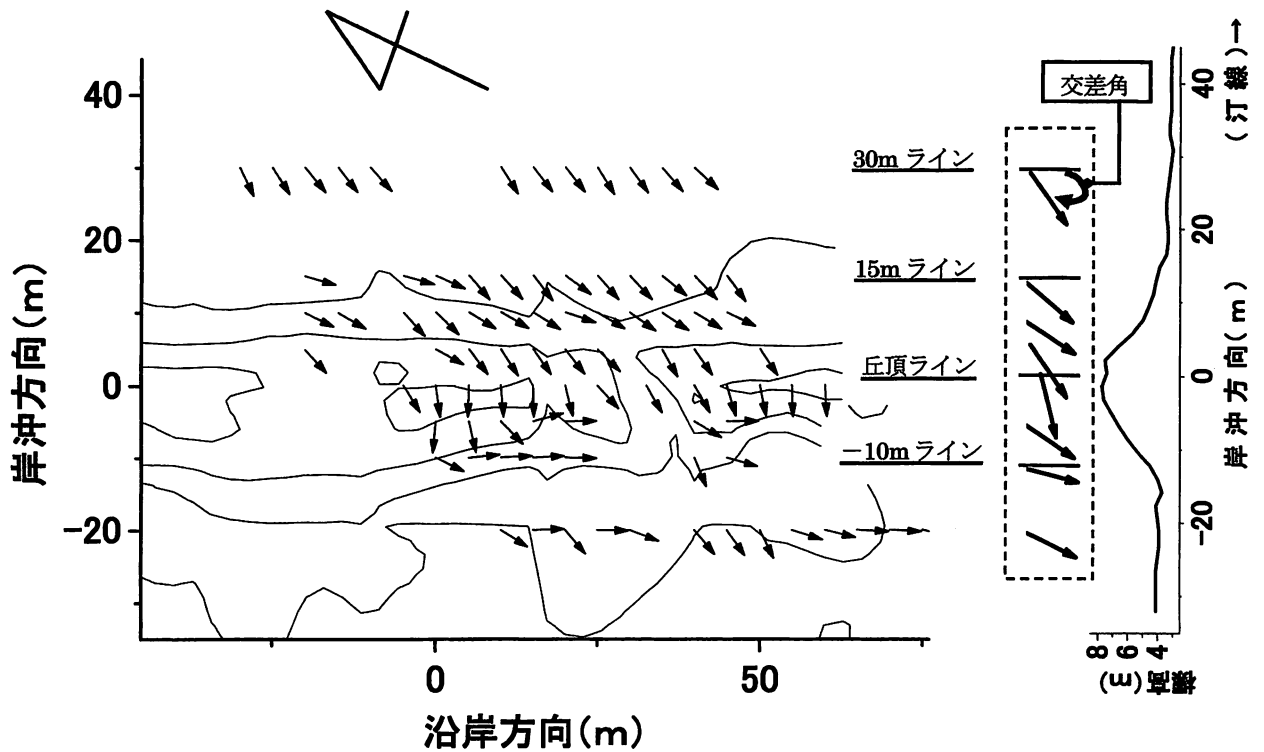


図7 風紋方位から推定した飛砂進行方向

右側破線内の矢羽は各ラインで平均した飛砂進行方向。右グラフは沿岸方向0m付近における岸沖方向の標高変化

また砂丘内陸側法面上の-5mラインや法尻にあたる-10mライン、さらに-20mラインでは、風溝の風下領域を除いて進行方向が再び大きく沿岸方向に偏向し、砂丘とほぼ平行になった。なお砂丘に対して斜め方向から風が吹くとき、砂丘を乗り越えた風が砂丘と平行な向きに変わることは堀田ら(2000)も報告しているが、その現象を詳細に調べた例はまだない。

以上風紋の方位から推定される飛砂の動きは、後浜上では風の向きに沿って砂丘に対し斜め方向に移動するが、砂丘に達した後は、砂丘法尻を沿岸方向に進むものと砂丘斜面を登るものに分かれる。分岐する割合は、斜面勾配の大きさに応じると考えられて、勾配が大きいほど沿岸方向へ進行方向を変える傾向にある。沿岸方向に進む飛砂は風溝の風上部まで到達すると、再度進行方向を変えて風向を通過した。風向を通過した飛砂は、砂丘頂部より20m以上内陸まで進行方向を維持した。

3.2 トレーサーの移動経路

各点から放出したトレーサーは、30mライン(放出位置)~15mライン間である程度の拡がりを得て風下方向に移動するが、風紋と同様におおよそその時の風向きにしたがって移動した(図8)。15mラインより内陸側は

砂丘地形が影響して、沿岸方向へ移動する成分が加わった。これも風紋で推定した飛砂進行方向の振る舞いと同じであるが、その傾向が顕著に見られるのはNo.2~No.4より放出したトレーサーで、No.7以降のトレーサーは沿岸方向への移動がほとんど見られなかった。No.2~No.4のトレーサーは多くが砂丘法尻付近で大きく向きを変え、沿岸方向を風溝に向けて移動した。ただしNo.2のトレーサーは沿岸方向へ移動しつつも、風溝に達するまでにすべて砂丘法面の砂草に捕捉されるか丘頂を越えた。No.3以降は、風溝を通過するトレーサーが増えた。No.2, 3, 4, 7のトレーサーのうち、風溝を通過しなかったトレーサーは全て風溝より北側で測定を終えた。No.7~No.9の放出点は、風溝から見て測定時の風上方向に位置するので、トレーサーの多くが法尻付近で沿岸方向の移動をすることなく風溝に進入した。No.10の位置になると、30mライン上で最も南側に位置するため、風溝を通過するトレーサー数は減少し、風溝の南側で測定を終了するトレーサーが増えた。

トレーサーを1つでも風溝を通過させた放出点はNo.2を除く全点で、それらは30mライン上で沿岸方向へ35mの範囲に及んだ。測定時の気象条件下では、実際に風溝を通過する飛砂も、後浜上ではある程度の範囲を通過してきたものと考えられる(図9)。

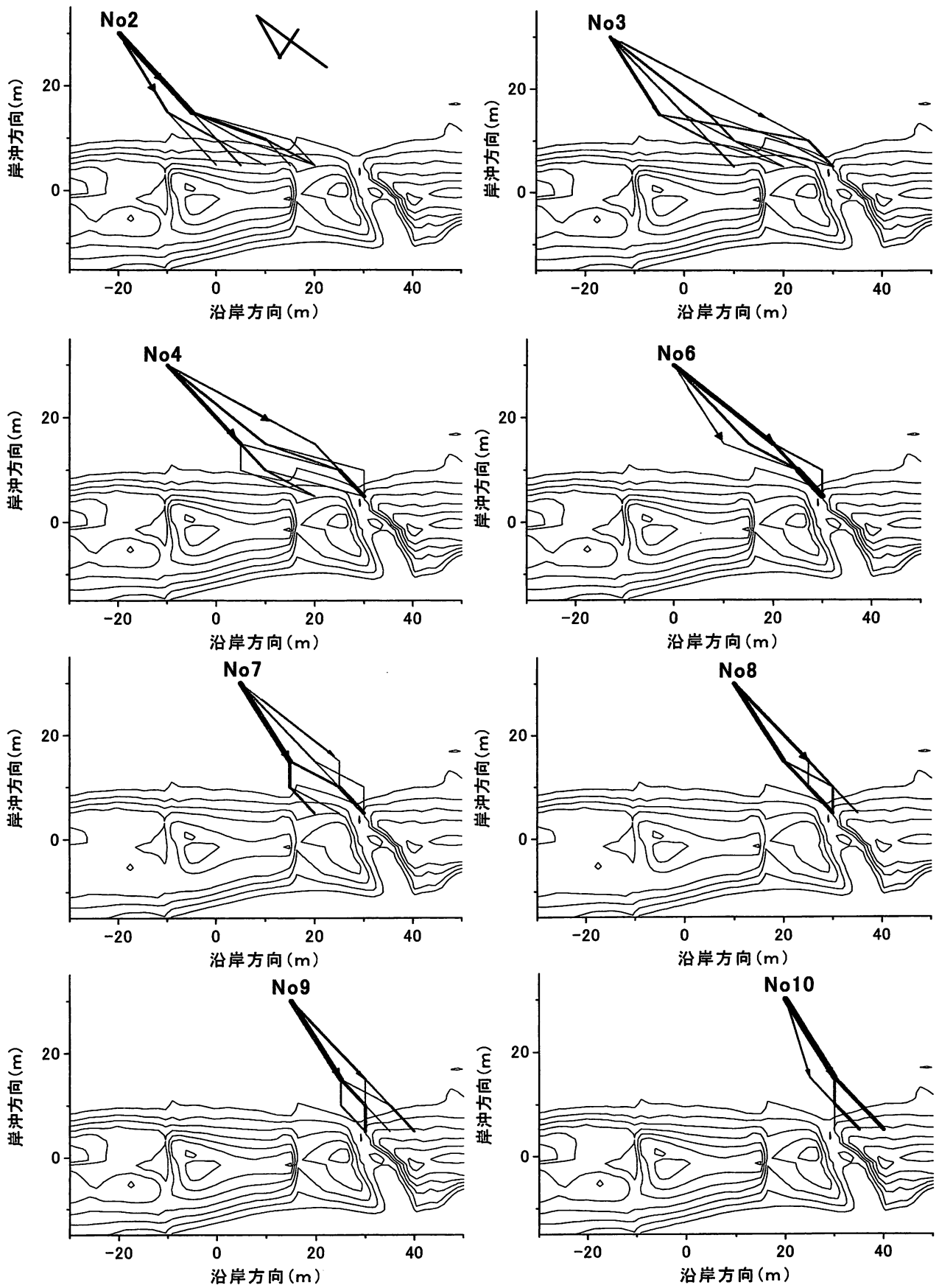


図8 No2~No10から放出したトレーサーの移動経路

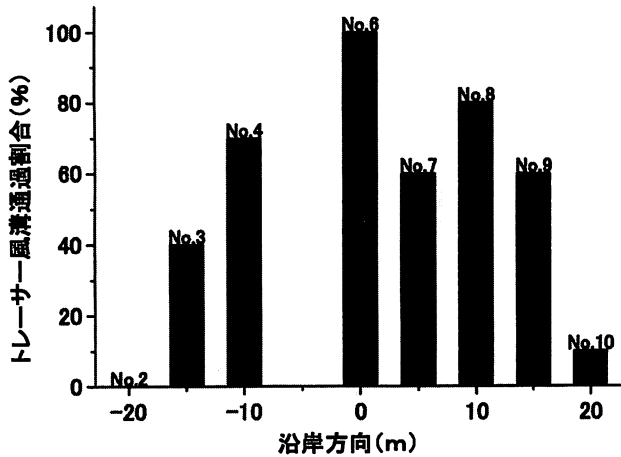


図9 各放出口からのトレーサー風溝通過割合(%)

3.3 飛砂量の測定結果

30m ライン上の飛砂量は 6.2 ~ 11.2kg/m/h の範囲で記録され、平均は 8.9kg/m/h であった(図10)。捕砂器の設置位置による測定値のばらつきはあるが、平坦な後浜上では測定時の風向に沿っておよそ 9.0kg/m/h 程度の飛砂量が通過していたといえる。一方、丘頂ライン上では風溝で飛砂量が 70.7kg/m/h と極めて大きかった。トレーサーの移動経路から、飛砂は砂丘に達すると法尻で移動方向の分岐が始まり、そのうち砂丘法面を登らないものが法尻付近を沿岸方向に移動して風溝に集まり、結果として風溝幅より広い範囲の後浜上の飛砂が風溝を通過したといえる。

風溝を除く丘頂ライン上の飛砂量の平均は 9.5 kg/m/h で 30m ラインより増加した。この増加分は、30m ラインと丘頂ライン間の領域を発生源としたか、測定範囲外の北側の領域より砂丘法尻に沿って移動してきた飛砂が含まれたと考える。

丘頂上では測定位置によって飛砂量のばらつきが大きかった。測定地の砂丘は砂草密度や法面勾配が均一でなく、さらに法面上や丘頂にも微小な凹凸地形が存在して、均質な条件でなかったことが影響したと考える。また丘頂で飛砂量が極端に少ない地点は、捕砂器の風上側地表面が砂草に覆われていた。砂草が発揮する飛砂抑止機能は野口ら(2001)も評価している。

4 まとめ

風紋方位から推定した飛砂進行方向とトレーサー移動経路の記録から、飛砂は後浜上ではその時の主風方向に沿って移動するが、砂丘法面に達するとそれまでの進行

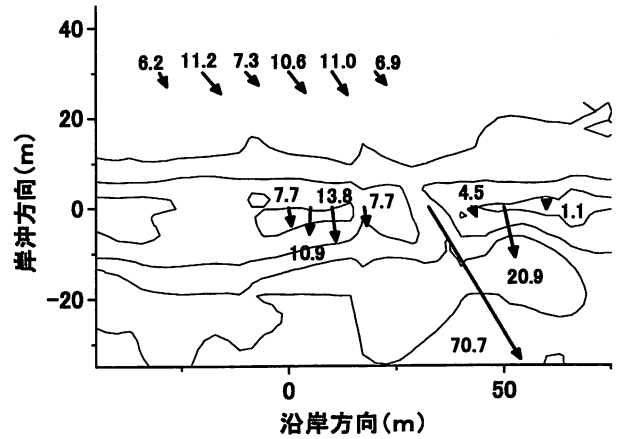


図10 捕砂器で測定した飛砂量

単位は(kg/m/h)、矢印の方向は風紋の方位

方向とは別に沿岸方向の成分も加わる。特に大きな法面勾配は飛砂に対して障壁のように働くため、砂丘に斜め方向から風が吹く時、飛砂は砂丘に沿って沿岸方向へ移動する傾向が強くなる。沿岸方向へ移動する飛砂は、砂丘の法尻付近を移動し、そのうち幾分かは砂丘法面を登るが、それ以外は風溝に集中すると考えられる。それらの飛砂が砂丘風溝の通過飛砂量を増加させたと考えられる。またそれら飛砂は、今回の測定と同様の風向・風速条件下であれば、丘頂から 30m 離れた後浜上で沿岸方向に 35m 程度の範囲を通過してきたものが集まったと推測される。

5 引用文献

- [1] 萩野裕章・野口宏典・坂本知己(2006): 風食が進行した人工砂丘風溝部における風速場と飛砂量について, 日本森林学会関東支部大会論文集, 57, 313-316
- [2] 堀田新太郎・畑中勝守・田中寛好・小泉圭右・大塚香織(2000): 人工砂丘周辺の風場による砂丘形状決定に関する研究, 砂防学会誌, 53(2), 22-33
- [3] 飯塚肇(1964): 森林防災学, 森北出版, 226-227
- [4] 野口宏典・萩野裕章・河合英二・坂本知己(2001): 海岸クロマツ林に発生した局所的な飛砂害についての検討, 日本森林学会誌 83(4), 355-358
- [5] 林野庁(1992): 治山技術基準解説・防災林造成編, 142-143
- [6] 末勝海(1968): 海岸砂防工に関する基礎的研究, 九州大学農学部演習林報告 43, 1-120

[受付 平成20年3月16日, 受理 平成20年6月20日]