

遠州灘海岸で見られる風紋の形態と成因 その2

1 研究の動機と目的

昨年度の研究では遠州灘海岸で見られる風紋の形について明らかにしたが、これが全国で見られるどの風紋でも共通した性質であるのかは不明であった。そこで今年度は駿河湾の相良海岸や山陰の鳥取砂丘の風紋と比較をすることにした。また、風紋の成因については、風洞実験やパソコンによるシミュレーションを参考にして多面的に追究していくことにした。さらに、遠州灘海岸の風紋を作る砂の起源について、流れ込む河川の砂や地質図と比較をして推定することにした。



写真1 中田島海岸で見られる平行型風紋

2 風紋の形

遠州灘海岸の風紋の断面の形が他の地域の海岸でも共通な性質であるかを検討するため、日本最大の鳥取砂丘や駿河湾の相良海岸の風紋と比較した。

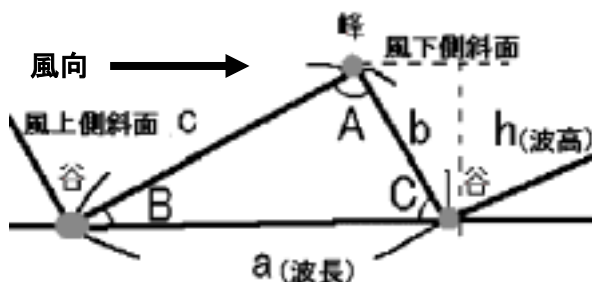


図1 風紋の断面形の要素

方法は定規で風紋の波長 a 、斜面 b , c 、波高 h (図1) を測定し、次に、それら a , b , c , h の値と余弦定理の公式を用いて $\angle A$, B , C を求めた。図2は浜岡砂丘、図3は鳥取砂丘、図4は相良海岸の結果、表1は3個所の値を比較したものである。図より風

紋の波長 a が変化しても、 $\angle A, B, C$ の値に変化がなく、3個所の値もほぼ等しい。したがって、地域が異なっても形成される風紋の断面形はほぼ同じであることがわかった。また、 $\angle B$ よりも $\angle C$ の方が大きいことから、風上側の斜面は緩やかで風下側の斜面は急であることが分かる。

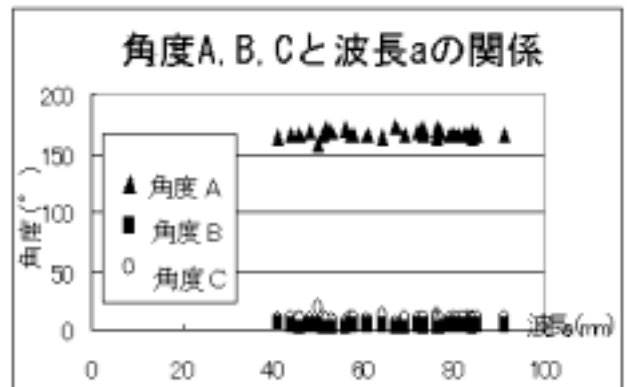


図2 浜岡砂丘（遠州灘）

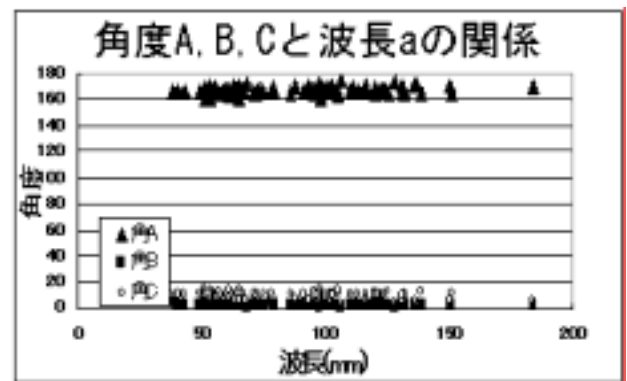


図3 鳥取砂丘（山陰海岸）

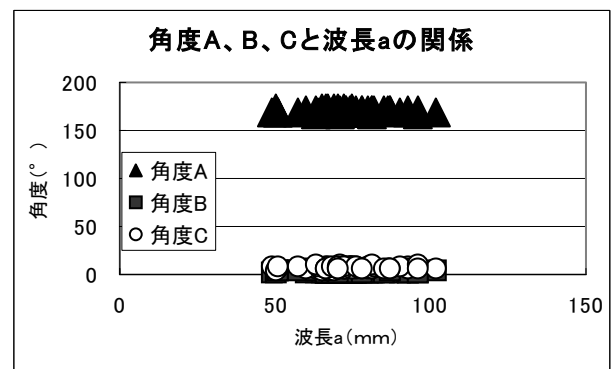


図4 相良海岸（駿河湾）

表 1 各海岸の風紋の形の比較 (斜面 b, c は波長を 1 とした時の値を示す)

地域	砂丘名	波長 a	斜面 b	斜面 c	角 A	角 B	角 C
遠州灘	浜岡砂丘	1.00	0.25	0.75	166.7°	3.3°	9.8°
駿河湾	相良海岸	1.00	0.28	0.72	170.0°	2.7°	7.2°
山陰海	鳥取砂丘	1.00	0.25	0.79	167.3°	2.8°	9.9°
平均		1.00	0.26	0.75	168.0°	2.9°	9.0°

3 風紋をつくる砂の特徴

昨年度は、風紋の縞模様を観察したところ砂の色や粒径が異なることに気づき、「風紋は砂の大きさや種類の違いによってできる」という仮説を立て、風紋を作る砂の粒径や鉱物組成を調べた。このとき、風紋を風上側の斜面と風下側の斜面の 2 つに分けて検討した。しかし、よく観察すると斜面の位置によっても、砂の粒径や鉱物組成に違いがあることに気が付いた。そこで、今年は斜面を細かく分割して、粒径や鉱物組成について再検討し、砂の形についても調査を行った。

(1) 風紋表面の明るさ

まず、風紋表面の色調の濃淡を調べるために明るさを調べた。方法は風紋をデジタルカメラで影が入らないように撮影し(写真 2 参照)、画像処理ソフトを用いて明度を測定した(図 5 参照)。この結果、風紋の谷と風上側の斜面、峰は暗く、風下側の斜面は明るくなっていることが分かった。

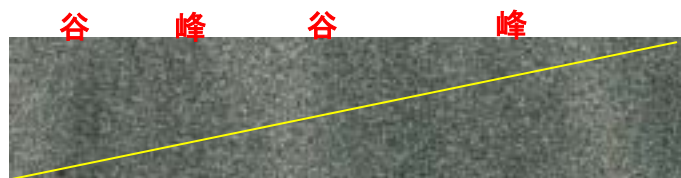


写真 2 明るさの分析に使った風紋の写真

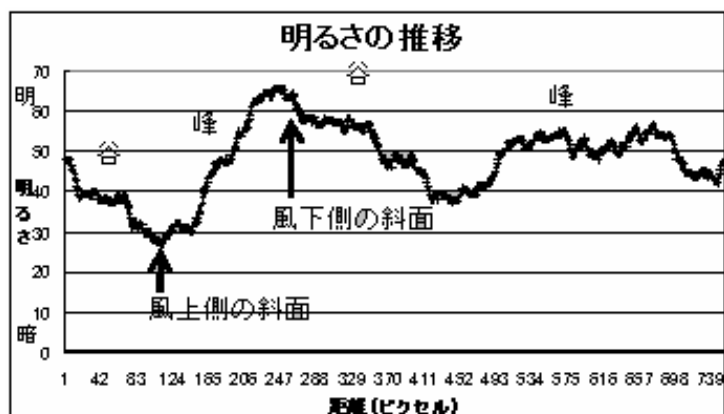


図 5 風紋表面の明るさの変化

(2) 風紋をつくる砂の鉱物

次に明るさの変化の原因は鉱物組成にあると考え、鉱物分析を行った。方法は部分別に砂を採集し双眼

実体顕微鏡で 100~200 粒程度鉱物分析を行った。

その結果、中田島砂丘の風紋は、風上側の斜面では磁鉄鉱などの黒色の磁性粒子、峰では黒色岩片、風下側の斜面では白色岩片や石英・長石が多く含まれていた。故に風紋表面の明るさの違いの原因は、鉱物組成の違いであることがわかった。また、鳥取砂丘の風紋も斜面によって鉱物組成の違いが見られた。しかし、中田島砂丘と異なり鳥取砂丘では白色やオレンジ色の粒子が多く含まれていた。このため、鳥取砂丘では中田島砂丘のような白と黒のはっきりとしたコントラストが見られなかった。

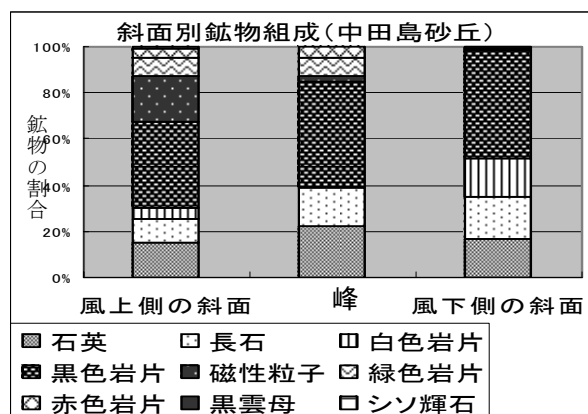


図 6 中田島砂丘の風紋の鉱物組成

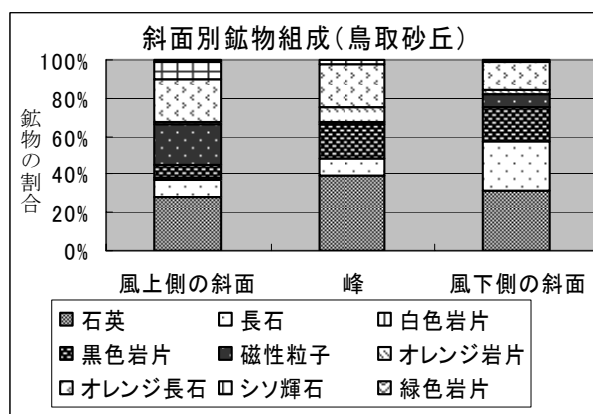


図 7 鳥取砂丘の風紋の鉱物組成

(3) 風紋をつくる砂の粒径

次に、風紋の谷や峰の位置による粒度の違いを調べた。方法は風紋の表面の砂をセロファンテープで採取し、5mm毎に顕微鏡写真に撮った。そして、画

面上での粒径を定規で測り、縮尺を用いて実際の砂の粒径を求めた。図8はその結果である。峰に粗い砂が集まり、峰から離れるにつれて、粒径が小さくなっていた。また、風上側の斜面の平均粒径は0.34mm、風下側の斜面の平均粒径は0.41mmで、風下側の斜面のほうがわずかに粗くなっていることが分かった。

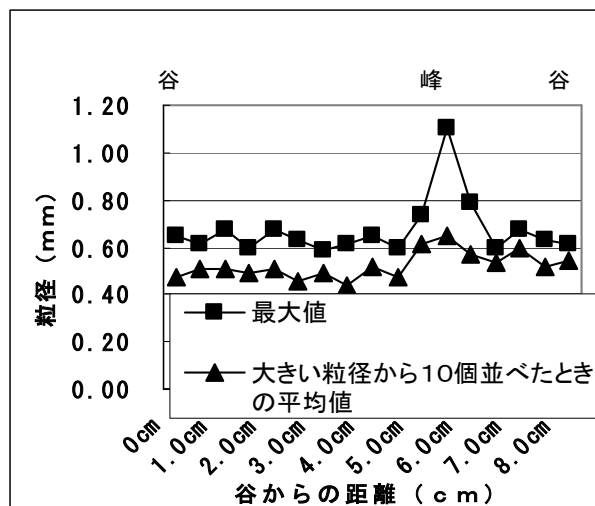


図8 粒径の変化

(4) 風紋をつくる砂の比重

風紋をつくる砂の比重が異なるのではないかと思います。比重瓶を用いて、比重測定を行った。この結果、比重は風上側の斜面で3.47、峰で2.84、風下側の斜面で2.68となった。風上側の斜面の比重が大きい原因は、比重の大きい磁性粒子がたくさん含まれているためと考えられる。また、峰と風下側の斜面にはあまり差がなかった。

(5) 砂の形

風紋の砂の形が砂の転がり易さや跳び易さに関係するのではないかと予想し、砂の円摩度を調べた。方法は砂を双眼実体顕微鏡を通してデジタルカメラで撮影し、Krumbein (1941) の円摩度印象図と比較して円摩度を求めた。その結果、全体を通して、円摩度は0.3~0.5の範囲に入り大きな差はなかった。平均円摩度も、風上側の斜面が0.41、峰が0.44、風下側の斜面が0.41とほぼ同じ結果となった。従って、円摩度は風紋の形成には大きな要素になっていないことが考えられる。しかし、詳しくみると風上側の斜面の黒色岩片はやや丸く、峰の黒色岩片は角張っている傾向がみられた。

4 風洞実験による砂の動き

今年度は風洞装置(縦1.38m横0.47m高さ0.46m、図9)を製作して砂の動きを粒径別に詳しく検討した。風洞実験の方法は風洞装置の底に砂を敷き詰め、大型扇風機で風を送る。このとき、砂丘と同じように細粒砂を投入し、砂を補充する。実験の様

子はビデオカメラとデジタルカメラで撮影した。

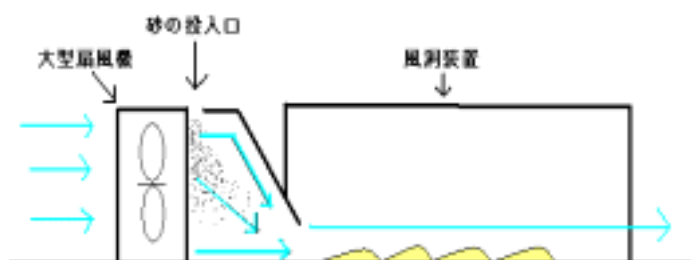


図9 風洞装置全体図

(1) 砂の軌跡

始めに、粒径ごとの砂の動き方を調べることにした。方法はパソコンでビデオをスロー再生し、画面にOHPシートをはって砂の軌跡を記録した。この結果、細粒砂はほとんどが吹き飛ばされて移動していた。そのうち、砂の表面を転がって移動したものは、ほぼ風上側の斜面に集まっていることが確認できた。中粒砂では転がって移動し、峰付近で止まるものと峰を越えて風下側の斜面で止まるものがあった。粗粒砂は、細粒砂が吹き飛ばされて埋もれていた粗粒砂が砂の表面に出てきても、ほとんど動かず、動いたものも峰で止まるか、風下側の斜面で止まっていた。

(2) 砂の動く速さ

次に砂の動く速さを求めた。方法は画面上での砂の動いた距離と動いたコマ数を数える。1コマが1/30秒であることと、縮尺を用いて砂の動く速さを求めた。この結果が図10である。平均速度は細粒砂が15.0m/s、中粒砂が8.52m/s、粗粒砂が2.66m/sとなった。したがって、粒径が大きくなるにつれて遅くなり、動きにくくなっていることが分かった。

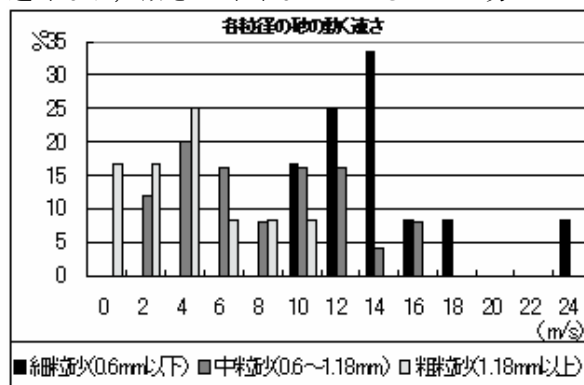


図10 粒径別砂の動く速さ

(3) 砂の分布

最後に風紋上の砂の分布を調べた。方法はデジタルカメラで撮った写真を、画像処理ソフトを用いて図の特定の色を明るくし、その他の色を暗くする。そして、明るさの変化を測定し、比較する。その結果、細粒の砂は、谷から峰の手前までの風上側の斜面に集まっており、中・粗粒の砂は風紋の峰付近と風下側の斜面に集まっていた。これは野外観察でわかった粒度組成の結果と一致していた。

(4) 砂の動きのまとめ

以上のことから、細かい砂は速い速度で吹き跳ばされて、風上側に堆積する。一方、粗い砂は動きにくく、動いても遅い速度で転がり、峰付近と風下側に堆積することがわかった。これを図示したものが図11である。

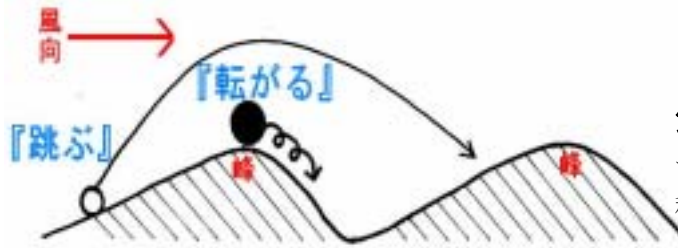


図11 砂の動きのモデル

5 風紋の形成モデル

以上の結果をもとに、中田島砂丘での風紋形成のモデルにまとめた。

第1段階 (図12参照)：風の吹かない無風状態のモデルで、細粒砂、中粒砂、粗粒砂が均等に分散している。

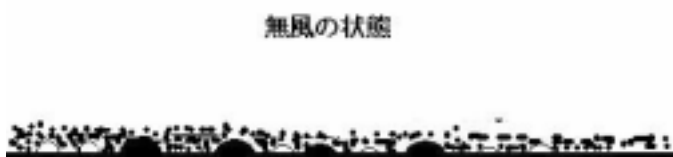


図12 第1段階のモデル

第2段階 (図13参照)：まず、風紋が動き始める4～6 m/sの風が吹くことによって砂表面の細粒砂が転がったり、飛んだりし始める。すると、図13のように、埋もれていた中粒砂、粗粒砂が地表面に出てくる。

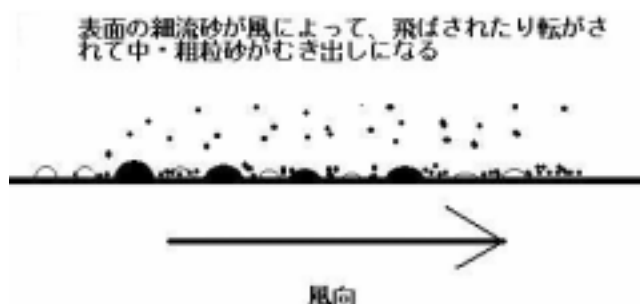


図13 第2段階のモデル

第3段階 (図14参照)：次に、地表に出ている中粒砂は飛んできた細かい砂や風の影響を受けて、転がって移動していく。粗粒砂はあまり動かず、その場に止まろうとするものと、中粒砂と同様に転がるも

のがある。転がった粗粒砂はすでに安定して止まっている粗粒砂の付近に集まり、峰を形成していく。



図14 第3段階のモデル

第4段階 (図15参照)：最後に、止まった粗粒砂のつくる峰に、動いた細粒砂や中粒砂がぶつかって堆積していく。このとき細粒砂は動きやすいため、一度止まっても、再び動き始めるものが多い。そのため、中粒砂が主となって、峰の周りに堆積していく。特に細粒砂は動きやすいため、風で大量に動かされ、風上側の斜面にぶつかって堆積し、図15のように緩やかな斜面を形成していく。しかし、風下側の斜面では、細粒砂は軽いため、峰付近の部分を吹く風によって、飛ばされたり、大きく転がされてしまったりして、通り越してしまい、風下側の斜面に堆積する量は少ない。一方、中粒砂は細粒砂に比べて重いことから、峰を吹く風を受けると風下側の斜面に転がり、堆積していく。また、粗粒砂はより動きにくいので、動く砂の量は細粒砂より少ない。そのため、堆積する砂の量は風下側より、風上側が多くなるため、風上側が緩やかで風下側が急な斜面を形成する。以上のことから、風紋は形成されると考えた。



図15 第4段階のモデル

6 風紋形成のシミュレーション

野外観察や風洞実験の結果をもとに、風紋をつくる砂の運動を「跳ぶ」と「転がる」の二つの要素に分けて、C言語によるプログラムを作成した。プログラムの実行結果が図16～19である。図のとおり、風が吹く前のステップ0では砂が均質に混ざっている状態でまだ風紋は形成されていない。風が吹き始めたステップ4で風紋ができ始め、風が吹き始めて暫くたったステップ8では風紋と似たパターンを作

ることに成功した。また、パラメーターを変化させることにより、波長の異なる風紋や枝分かれ型の風紋が形成された。これより、風紋は砂の動きやすさの違いによって形成されること、風速が大きくなるにつれて風紋の波長が大きくなること、風紋が形成される風速に限界があることなどがパソコン上で再現できた。よって、砂の「跳ぶ」と「転がる」運動の2つの要素が絡みあって風紋ができることがわかった。



図16 ステップ0 無風の状態で風紋まだ何もできていない。



図17 ステップ4 平行型風紋が出来はじめる。
(風の向きは右向き)

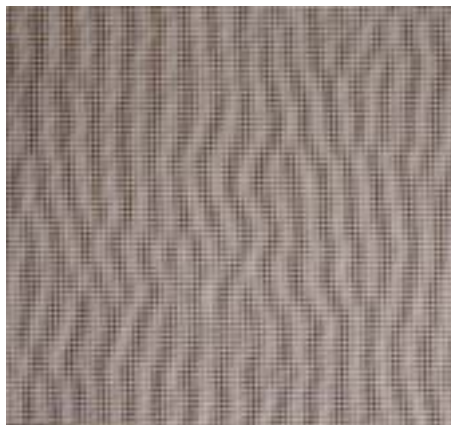


図18 ステップ8 平行型と枝分かれ型の風

紋ができる

7 結論

遠州灘海岸で見られる風紋について、今年度は野外観察、風洞実験、コンピュータシミュレーションより次のことを明らかにした。

- (1) 風速が 6.5m/s 前後で風紋が出来始め、風速が大きくなると波長も大きくなる。
- (2) 波長が異なっても形は相似である。
- (3) 風紋の峰や谷、風上側斜面、風下側斜面では砂の粒径や鉱物組成が異なる。
- (4) 砂の運動には粒径や質量の違いにより「跳ぶ」と「転がる」2つのパターンがあり、この運動の組み合わせによって風紋はできる。

8 今後の課題

- (1) 風紋上の砂の運動の詳細な解析を行う。
- (2) 砂粒の形によって、動きやすさがどのように違うのか調べる。
- (3) 風紋は全体がゆっくりと動いていると言われているが、どのような仕組みで動いているのかを調べる。
- (4) 砂の粒径によって鉱物の種類が異なる原因を調べる。

9 謝辞

広島大学大学院理学研究科数理学教授 西森拓先生
静岡理工科大学理工学部教授 菅沼義昇先生
筑波大学システム情報工学研究科 羽田野祐子先生
にお世話になりました。

10 参考文献

松倉公憲(1977):風成砂床形の形態とその形成条件, 地理学評論 50, 412-419
浜松北高校地学部(1984):風紋に関する研究, 生徒理科研究論文集昭和 60 年度版, 71-76
田口善弘(1995):砂時計の 7 不思議, 粉粒体の動力学, 中公新書, 39-64
西森拓(2005):動く砂丘ー砂のダイナミックス, 国際高等研究所出版, 103-121
など