

第3章 「発達史」と「形成プロセス」の観点から調べた鳥取砂丘の地学現象

小玉 芳敬

1. はじめに

2008年山陰海岸ジオパークは日本初のジオパーク7地域のひとつに認定され、2009年10月28日には日本ジオパーク委員会において山陰海岸が世界ジオパークへの加盟申請地域として推薦されることが決定した。このような情勢のもと山陰海岸ジオパークの一端を担う鳥取砂丘において、学術研究が進められ、我が研究室においてもこの3年間で鳥取砂丘に関連する12本の卒論と3本の修論の取り組みがなされてきた。そのほか、独立行政法人産業技術総合研究所の田村亨氏との共同研究で新砂丘の形成過程に関する調査が進行中である。

このうち本稿では以下の6テーマの概略を紹介する。1)新砂丘の発達史、2)最近40年間の鳥取砂丘海岸にみられる沿岸砂州の変遷、3)最近4年間の鳥取砂丘沿岸砂浜堆積物の粒度分布、4)sandblastingによる植生管理を目指した基礎実験、5)スリバチ地形の成因と分類、6)最近20年余りで乾燥地研究センター砂丘地に成長した放物型砂丘（パラボリックデューン）、である。これらはいずれも「地形発達史」と「地形形成プロセス」の両眼で、鳥取砂丘の現状認識を深めるための試みでもある。

2. 地中レーダによる新砂丘の探査

鳥取砂丘において地中レーダ（G.P.R. : Ground Penetrating Radar）と光ルミネッセンス年代測定（O.S.L. : Optically Stimulated Luminescence）を組み合わせる砂丘の形成史を探る研究が、産総研の田村亨氏

を中心にして精力的に行われている。地中レーダ探査ならびにOSL年代測定用試料の採取を2008年～2009年にかけて実施した。



図1 2008年に実施した地中レーダの測線

TTD01～TTD03の青色で示された3測線で探査。

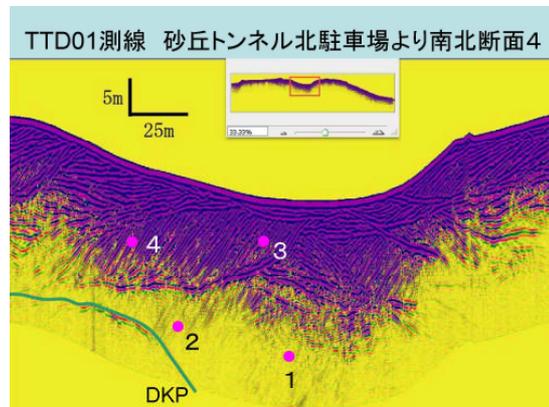


図2 地中レーダ断面の一例

TTD01の部分拡大図で、右側が北である。堆積構造より、数字1～4の順番で砂が堆積したことが読み取れる。DKPは火山灰層と推定される地層を示す。

図1は特別保護区域で実施されたGPRの探査測線3本の位置を示している。図2はGPRにより得られた、砂丘の堆積構造を可視化し

た画像の一例である。このように条件次第では、深さ 25m くらいまでの堆積構造を知ることができた。

画像を元に地層の堆積順序を組み立て、OSL 用試料の採取地点と深度を決め、ハンドオーガーによる試料採取を試みた。詳しくは、田村ほか（2009）を参照のこと。天然記念物区域からは 19 地点 37 ポイントの試料を採取し、それらの年代測定が現在イギリスで実施されている。

3. 鳥取砂丘海岸の沿岸砂州の規模変遷

砂浜海岸の沿岸域を上空から眺めると、水深の浅くなった部分が白く帯状に観察される。これらは、海水面下に砂が堆積して形成された沿岸砂州である。鳥取砂丘沖（千代川河口～岩戸）には 2 段の沿岸砂州が発達しており、1968 年～1998 年にかけて規模の縮小が報告されている（小玉, 2002）。沿岸砂州の規模縮小は、砂浜の侵食と密接に関わる現象である。鳥取砂丘沖に発達する沿岸砂州の変遷を明らかにし、その要因を考察することは砂丘の草原化原因を知る上でも重要である。

3-1 調査方法

3 種類の調査が実施された。1968 年～2008 年まで 5 年おきに撮影された 9 セットの空中写真（鳥取県立博物館所蔵の鳥取県郷土資格定点資料）から、鳥取砂丘沖の沿岸砂州を判読し図化した。ただし 1988 年の空中写真は不明瞭であったため、解析から除外した。また鳥取県が所蔵する 1988 年、1997 年、2003 年の鳥取県深淺測量図、および 2007 年の断面測量データから浅海底の縦断形を作成し、沿岸砂州の発達状況を空中写真の判読結果と比較した。最後に、千代川の行徳水位流量観測所における流量を調べ、大規模な出水と沿岸砂州の規模変遷との関係を考察した。

3-2 沿岸砂州の規模変遷と千代川の大規模出水

空中写真から沿岸砂州を判読した結果を図 3 に示した。1968 年には海岸線にほぼ平行して直線的な沿岸砂州が広がっていた。しかし、1973 年、1978 年と千代川河口部から徐々に沿岸砂州の規模が縮小し、この傾向が岩戸側へと伝播していった。その後、1988 年まで沿岸砂州の規模縮小は続く。1993 年には一時的に規模拡大が確認されたが、1998 年には再び沿岸砂州は規模を縮小した。このように 1968 年～1998 年にかけては、増減を繰り返しながらも、沿岸砂州が徐々に規模を縮小してきたことがわかった。ところが、2003 年の空中写真を見ると、1968 年の沿岸砂州よりも格段に規模が拡大した。2008 年についても同様であった。また 1998 年までの沿岸砂州に比べ、2003 年と 2008 年の沿岸砂州は、形成位置がより沖合に移動していた。

さらに、千代川の大規模な出水と沿岸砂州の規模拡大とに関連性が認められた（図 3）。1990 年の大規模出水の 3 年後、1993 年には沿岸砂州の規模が一時的に拡大した。また、1998 年に起こった 2 度の大規模出水直後には、沿岸砂州の規模拡大は見られなかったものの、2003 年には沿岸砂州の規模が大きく拡大した。すなわち、千代川の大規模出水の 2～3 年後に、沿岸砂州の規模拡大が確認できる。大規模出水に伴い千代川の河床には砂が充満し、引き続き中規模出水で沿岸部にまで砂が運ばれたためと考えられる。

1990 年の出水によって拡大した沿岸砂州は、1998 年の時点では規模を縮小した。しかし、1998 年の大規模出水後の 2003 年の空中写真、2004 年の大規模出水後の 2008 年の空中写真からは沿岸砂州の規模縮小は見られなかった。これは、大規模な出水が短期間に 4

度も起こったことにより、多量の砂が沿岸部に供給されたためと考えられる。詳しくは、藤井・小玉（2009）を参照のこと。

3-3 流砂系からみた鳥取砂丘の現状

1968年～1998年までの30年間、規模縮小の一途をたどっていた沿岸砂州が、最近5年～10年の間、規模を一気に拡大した。

1998年以降千代川で発生した4度の大規模

出水により、鳥取砂丘沖の浅海底には多量の砂が供給され、最近40年間の中で最も砂が多くなった時期を迎えている。この事実が、砂浜さらには飛砂量にどのような影響を及ぼすかを詳細にモニタリングすることは、砂丘の草原化対策を検討する上でも極めて重要である。

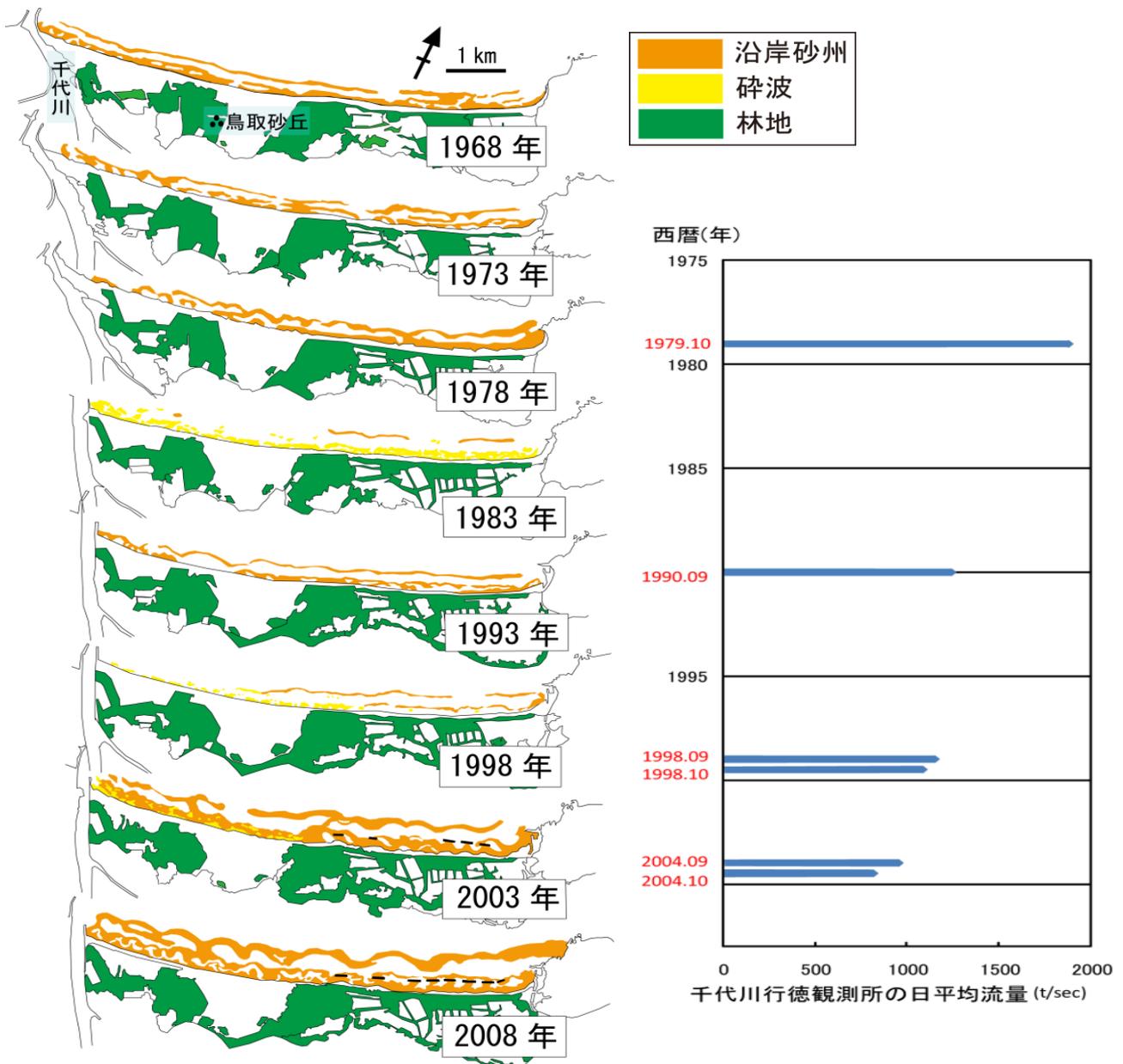


図3 鳥取砂丘沖に形成される沿岸砂州の規模変化と千代川の大規模出水

4. 鳥取砂丘砂浜堆積物の粒径分布

鳥取県では総合的な土砂管理ガイドライン（鳥取県, 2005）に基づいて、2005 年以來、鳥取砂丘沿岸でサンドリサイクル事業を継続して実施しており、モニタリングの実施要項も発表されている（鳥取県, 2006）。本稿ではサンドリサイクル事業が始まる直前の鳥取砂丘の海岸堆積物（2004 年 12 月～2005 年 2 月）と 2009 年 5 月の海岸堆積物の粒度組成を調査した結果を速報する。鳥取砂丘沿岸の砂浜堆積物の粒度に関して徹底的に調べられたデータはこれまでに公表されていない。ここで提示されるデータがモニタリングの一助となれば幸いである。

4-1 調査地域と調査方法

調査対象地域は、図 4 に示す千代川河口右岸側から鳥取市福部町岩戸まで続く一連の砂浜海岸である。2004 年 12 月～2005 年 2 月の冬季にかけて、田代圭祐氏（当時、鳥取大学大学院教育学研究科 1 年）が、鳥取砂丘沿岸の砂浜で、静穏時と暴浪時の海岸堆積物の変化を調べる目的で調査した際の貴重な試料が研究室に保存されていた。それらは約 200 m 間隔で波打ち際の堆積物が採取されたものであった。2009 年 5 月 10 日には、最大風速 8m/sec 以下の日が 10 日以上にわたり続いた穏やかな時期に砂浜を調査した。ガーミン社製のハンディーGPS (eTrex Vista) を用いて、千代川河口右岸側から岩戸までの砂浜で、200 m 間隔で試料を採取した。この時、波打ち際にはバーム地形が形成されており、バームクレストで試料を採取するように心がけた。多くの箇所は波をかぶり湿った状態であった。粒度分析には、沈降管粒度分析装置を使用した。フリーソフト STube (成瀬, 2005) で制御される分析装置で、沈降速度の解析には Gibbs *et al.* (1971) を用い、1 試料あたり 4

分の沈降時間で分析を実施した。

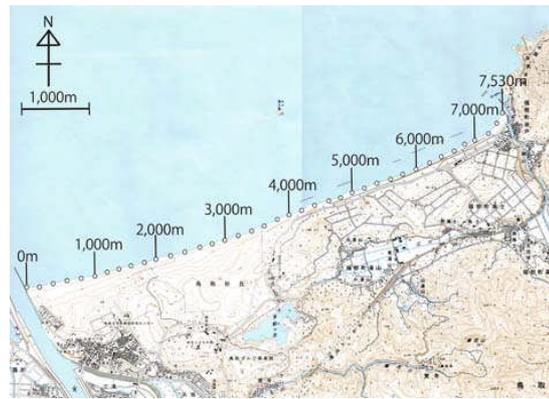


図 4 砂浜堆積物試料の採取地点

国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図「鳥取北部」「浦富」図幅の一部に加筆した。

4-2 モードと中央粒径の東西変化

本稿ではヒストグラムの最大値を示すモードと、積算重量で 50%に相当する中央粒径について報告する。これらの東西変化を図 5 に示した。縦軸の ϕ スケール数値を反転させることで、粗い粒径が上方に、細かい粒径が下方となるように調整した。

まずモードから全体的な傾向を見ると、2 つの系列にわかれることが読み取れる。すなわち 2ϕ (0.25mm) を中心としたモードと、 -1ϕ (2mm) ～ 0ϕ (1mm) を中心としたモードである。前者は千代川河口からの距離で 0 m～800m と 4,000m 以降に、後者は 1,000m～4,000m の区間で確認できる。2,000m 付近の 2004 年 12 月 15 日のデータや 5,200m 付近の 2009 年 5 月 10 日のデータなどは、その周囲の値と比べると異常値を示すものの、大局的には 2 つのモード系列上にある点が興味深い。

このことから鳥取砂丘沿岸堆積物には、双峰性の粒径分布を示す岩屑が存在していると考えられる。それらがバームに堆積する際、4,000m 付近でモードに急変を招く何らかの

仕組みがあることを示唆する。

次に中央粒径の東西変化をみると、同様に800m付近と4,000m付近に不連続が認められた。0m~800m区間と4,000m以降の区間で中央粒径の東方への細粒化傾向が一連のものとして理解できる。すなわち、500m前後で1.5φ(0.35mm)を示すものが、6,000m前後では2φ(0.25mm)以細へと細粒化傾向を示す。また800m~4,000m区間でも東方細粒化が読み取れる。すなわち-0.5φ(1.41mm)から0.3φ(0.81mm)へと中央粒径が東方へ著しく細粒化している。詳しくは、川内・小玉(2010)を参照のこと。

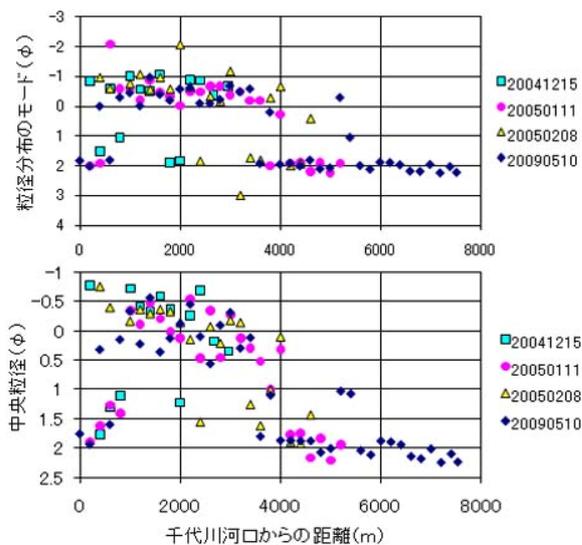


図5 鳥取砂丘沿岸の砂浜における粒度の東西変化

4-3 考察とまとめ

これらの粒径変化は、千代川の河口から流出した砂が沿岸流により東方に運搬されていく過程で、波浪による砂粒の破碎・摩耗作用をうけ次第に細粒化するプロセスと、細粒岩層の選択的な運搬プロセスを反映したものと考えられる。中央粒径の不連続が生じるメカニズムに関しては、人工リーフに伴う急速な堆積が関与していると考えられるが、詳細は

残された課題である。その際には砂浜堆積物の粒径分布ヒストグラムばかりか、浅海底の地形に応じた堆積物の粒径分布ヒストグラムもあわせて検討することが求められる。またこれら堆積物の鉱物組成調査も有効であろう。つまり、砂浜から浅海底を含めた平面的な堆積物の分級状態を把握した上で、浅海底—砂浜の地形や堆積物の変化をダイナミックにみる眼が必要となる。

2005年から続けられているサンドリサイクル事業に関しては、千代川河口部で浚渫した堆積物を河口から東方へ4,000m~5,500m付近の沖合に投入してきた。少なくとも砂浜堆積物の粒径変化からは、サンドリサイクルの影響は読み取れない。なぜなら、サンドリサイクル事業が始まる直前の冬(2004年~2005年)に採取した堆積物のモードや中央粒径と、2009年5月の結果とに大差がないからである。今後も長期にわたる継続的なモニターリング調査が必要であろう。

鳥取砂丘が面する砂浜の堆積物は、モードと中央粒径が大きく2つの系列に分かれることが明らかになり、これらの系列間では粒度に急変が生じる事実が、はじめて指摘された。これらの原因解明は今後に残された課題である。

5. 砂の吹きつけ (sandblasting) による植生管理に向けた基礎実験

砂浜の規模縮小や粗粒化は、いずれも砂浜からの飛砂量の減少へと直結する。このことが、鳥取砂丘で現在進行している草原化の根本的な原因のひとつと考える。飛砂が新たな飛砂を生む飛砂現象の特性 (Bagnold, 1941) を反映して、砂浜からの飛砂量低下は砂丘地内での飛砂量の減少を招く。すると、砂丘植物以外の植物にも、生育できる環境が整い、

草原化が加速すると予想される。すなわち、砂丘地での飛砂量減少が草原化の主要な原因と考えられる。すると、植生が繁茂した地点の対策として、飛砂が多い環境を人為的に創出して、植生の管理ができないかといった発想が生まれてくる。

5-1 実験方法

共立パワーブロワーPB-650を用いて、砂丘砂を植物に吹き付けるsandblasting実験（図6）が実施された（西田, 2007）。飛砂による損傷に対する植物の耐性を観察する現地実験である。さらにsandblastingと併用して、希釈した海水を散布すること（seawater spray）で、植物の耐性を観察する現地実験も行われた（黒河, 2008）。

両実験は鳥取大学乾燥地研究センター敷地内の砂丘地で2006年～2007年の2ヶ年間、夏～秋にかけて行われた。1 m四方のプロットを40カ所程設け、調査地域での優占種であるビロードテンツキ（砂丘植物）とオオフトバムグラ（非砂丘植物）を主な調査対象として実験を行った。

Sandblastingのみの実験では、吹きつけ時間（1分, 1分30秒, 2分, 3分）、回数（1回～7回）、頻度（3～4日間隔, 7～8日間隔, 14～15日間隔）をかえた22 ケースの実験が行なわれた。実験前、プロット内に生育するビロードテンツキとオオフトバムグラの個体数を数え、実験後に萎れたものや枯死したもの以外の、「生き残った」と判定された個体数を数えることで、「見かけの生存率」を求めた。

5-2 sandblasting実験の結果

実験の結果、積算の吹きつけ時間が3～4分で見かけの生存率が40 %未満になること、複数回の吹きつけを行うと生存率が低下することなどが、2つの植生に共通して認められた。さらにsandblasting終了後、1ヶ月間の植生回

復状況には、砂丘植物と非砂丘植物とで顕著な違いが明らかになった（図7）。



図6 sandblasting 実験風景

吹き出し筒の途中にペットボトル製の給砂装置を設け、ここに現地の乾いた砂を補給することで砂風を植生にあてた。小玉（2009）より。

すなわちビロードテンツキでは早いケースで1週間後には見かけの生存率が80 %以上に回復した。9月中旬までにsandblastingを終了すれば、多くのケースで60 %以上への回復が認められた。いっぽうオオフトバムグラでは、8月中旬までにsandblastingが終了したケースでわずかに植生の回復が認められたものの、その生存率は40 %以下であった。9月中旬以降に実験を終了したケースでは、植生回復は認められなかった。

すなわち、7月の梅雨明けから9月上旬まで、sandblastingを1 m²あたり2分間、1～2週間の間隔をあけて2回実施すれば、ビロードテンツキを生き残らせ、オオフトバムグラを枯死させることが実現可能と思われる。

飛砂に対する耐性が比較的強い砂丘植物の特性をうまく利用した植生管理の手法といえる。詳細は、小玉（2009）を参照のこと。

5-3 考察とまとめ

Ogura and Yura（2008）の実験では、

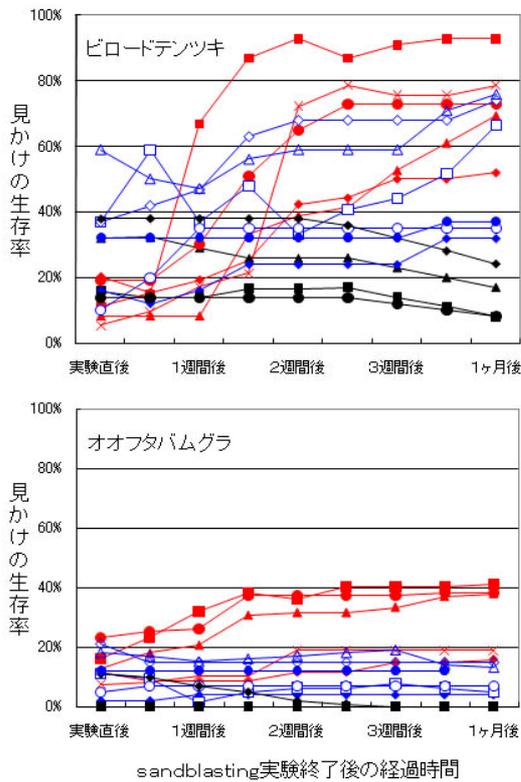


図7 sandblasting 実験終了後の植生回復

西田 (2007) のデータより作図した。線で結ばれた点は実験プロットごとの結果を示す。sandblasting を終了した時期に応じて色分けをした。つまり、赤色：8月中旬、青色：9月中旬、黒色：10月上旬である。9月に関しては、早い時期の4プロットを白抜きで、遅い時期の2プロットを青塗りで区別した。小玉 (2009) より。

sandblastingのみで植物を枯死させることができず、海水噴霧との併用の重要性が指摘された。しかし西田 (2007) や黒河 (2008) の実験は、sandblastingの仕方次第で植物は枯死することが示された。希釈した海水を噴霧する場合には、実施後に様々な影響が懸念されるので、さらに慎重な検討が求められる。

またSandblastingによる枯死率は、発芽後の経過日数に応じて弱まるのが、Fryrear

and Downes (1975)により指摘されている。梅雨明けの若芽が芽吹いた頃であれば、より短時間のsandblastingで、非砂丘植物を効率的に枯死させることが可能であろう。

将来的には、掃除機とブロアーを兼ね備えた大型トラクターのsandblaster (図8)が開発され、現在の耕耘機のかわりに観光砂丘においてsandblastingによる植生管理作業が実施されることを期待したい。



図8 sandblaster の想像図 (作画：梅原舞乃)

6. スリバチ地形の成因と分類

天然記念物鳥取砂丘の特異な地形の一つとして「スリバチ」があげられる。徳田(1917a ; 1917b ; 1917c ; 1917d)や鳥取県(1929、71-86)などにより鳥取砂丘のスリバチ地形が分類された。つまり、1)平面形態(馬蹄形と弓形)、2)スリバチ地形底部の湧水状況、3)スリバチ地形の構成物質(土と砂)、を組み合わせで分類された。しかし、この分類にはいくつかの問題が残る。1)スリバチ地形の認定基準が曖昧である点、2)スリバチ地形の形成プロセスが明らかにされていない点、3)現在では、人工改変を受けてすでに消滅した、もしくは原形を留めていないスリバチ地形が含まれる点、である。そこで大縮尺地形図の読図計測・空中写真判読・風況データの解析・風洞実験・現地調査を駆使して、スリバチ地形の定義を

明確にし、成因を考え、スリバチ地形の再分類を試みた。

6-1 大縮尺地形図の図上計測

大縮尺地形図（等高線間隔 2m で描かれた 1/4,000 鳥取市都市計画図）で、鳥取県(1929)のスリバチ分布図を参考にして、スリバチ地形の位置を特定した。そして地形図読図により湾曲した滑落斜面と凹地の組み合わせをスリバチ地形と認定し、それらの形態特性を探る目的で図上計測を行った。

スリバチ地形の部位名称を図 9 のように定義する。湾曲した滑落斜面の最も奥に入り込んだ部位を Bay (湾)、湾曲の両端を Horn (角) と呼び、それぞれ滑落斜面上端の遷急点とした。そして幅・比高・奥行きについて計測を行った。幅は 2 つの Horn 間の直線距離、比高は Bay と滑落斜面基部の遷緩点の標高差とした。奥行きは Bay から、Horn の 2 点を結ぶ直線までの距離とした。平面形態の湾入度合いを示す指標として、(奥行き/幅) を求め、湾入度とした。

大縮尺地形図の図上計測結果を図 10 に示す。湾入度が 0.3 を境にして、馬蹄形スリバチと弓形スリバチに分類することができた。一ツ山スリバチは、従来の分類では弓形スリバチとされてきたが、湾入度が 0.38 と高い値を示すため、平面形態から判断すれば馬蹄形スリバチが妥当である。

また、隣接する弓形スリバチに関しては、いずれも湾入度が近い値を示した。おそらく形成プロセスの類似性を反映しているのであろう。

本研究では、スリバチ地形の新たな認定基準として、「湾曲した滑落斜面とその滑落斜面に囲まれた凹地より構成され、幅 70m 以上、比高 5m 以上、湾入度 0.1 以上である砂丘内に形成される地形」を提案する。等高線間隔 2m

で描かれた地形図から読図可能な小地形である。

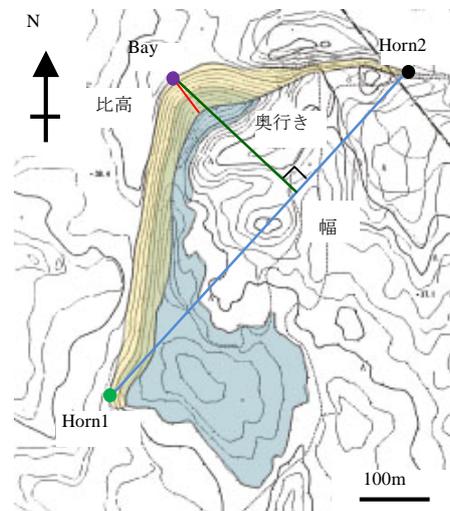


図 9 スリバチ地形の地形計測要素

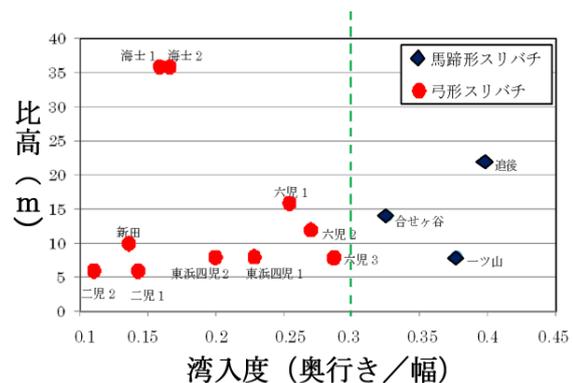


図 10 スリバチ地形の地形計測結果

6-2 空中写真判読および風況調査

1952 年に撮影された鳥取砂丘周辺の米軍空中写真（縮尺：4 万分の 1）と、建設省国土地理院によって 1972 年に撮影された鳥取全県カラー空中写真（縮尺：8 千分の 1）を判読した。また気象庁鳥取地方気象台湖山観測所の気象データより、2003 年～2009 年までの期間について、日最大風速が 10m/sec 以上の強風が吹いた日数をカウントし、それらの風向き（16 方位）を調べ、風配図を作成した。

図 11 には 1952 年の空中写真で判読された砂丘列およびその前縁斜面の分布を描いた。

実線が砂丘列(太線：第2砂丘列および第3砂丘列のクレスト(稜線)、細線：その他の砂丘列のクレスト、ケバ：前縁斜面)を示し、破線は1972年の砂丘地と防砂林地帯との境界を示す。なお、第2砂丘列と第3砂丘列の背面に判読された砂丘列について、本研究で「小型砂丘列」と命名した。これまであまり注目されてこなかった地形である。

小型砂丘列の多くが北東方向から緩傾斜で登り、南西方向へ急傾斜(安息角)で下る非対称な断面形態を示し、その伸長方位は $N26^{\circ}W \sim N38^{\circ}W$ であった。1972年の空中写真でも、同様な小型砂丘列を判読でき、その伸長方位は $N27^{\circ}W \sim N41^{\circ}W$ であった。1952年から1972年の20年間で小型砂丘列は南西方向に平均150m移動したことがわかった。

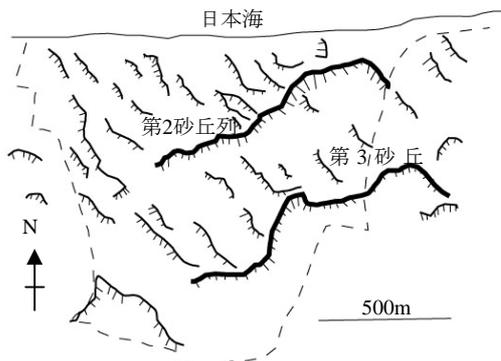


図11 1952年 空中写真から判読された砂丘列とその前縁斜面の分布

次に、日最大風速が10m/sec以上の強風の風配図と砂丘列との関係を調べた。2008年現在の第2砂丘列の伸長方位は $N58^{\circ}E$ であり、これを図12の風配図に紫色の太線で記入した。全体的な傾向として、第2砂丘列南側からの強風が圧倒的に少なく、夏期に生じる南南東の強風のみであった。発生頻度の高い順に風向をみると、西風が最も多く、次いで北東風、西北西風であった。これらと比べると北西風～北北東風はやや少なかった。つまり、第2砂丘列に直交するような強風だけでなく、

むしろ北東方向や西方向から斜交する強風が多頻度で吹いている。このことが小型砂丘列の形態や移動に、また弓形スリバチの地形に影響を及ぼしていると推察される。

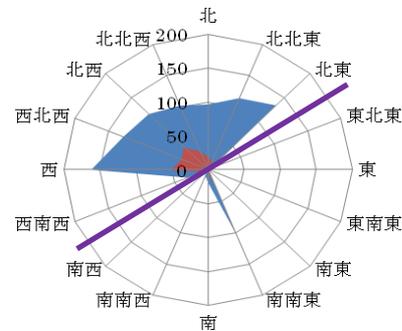


図12 鳥取地方気象台湖山観測所の日最大10m/sec以上の風向頻度分布
2003～2009年の積算回数より作成した。
中心部の赤色は風速15m/sec以上を示す。

6-3 スリバチ地形の成因を探る風洞実験

スリバチ地形は平面形態からみて、馬蹄形と弓形にわかれる。それぞれについて風洞実験により成因を探った。

i) 馬蹄形スリバチ

まず馬蹄形スリバチに関しては、鳥取大学工学部海岸工学研究室の送風機がついた矩形断面水路を使用した。その全長は28.50mあり、上流部と下流部の2つで構成される(図13)。上流部には大型送風機とそれに続く管路があり、下流部には、長さ15.8mの矩形断面水路が続く。水路部は、幅60cm、深さ1mであった。この水路部分にふた(天板)を設けることで閉管水路(風洞)に改装した。天板はコンクリートパネルで作成した。

ただし、風洞の上流端から9.1m下流地点より、長さ4mのナイロンメッシュシート(115cm×4m、目開き57μm)を天板のかわりに設置した。ナイロンメッシュシートは風を風洞外へ排出し、風により舞い上がる砂

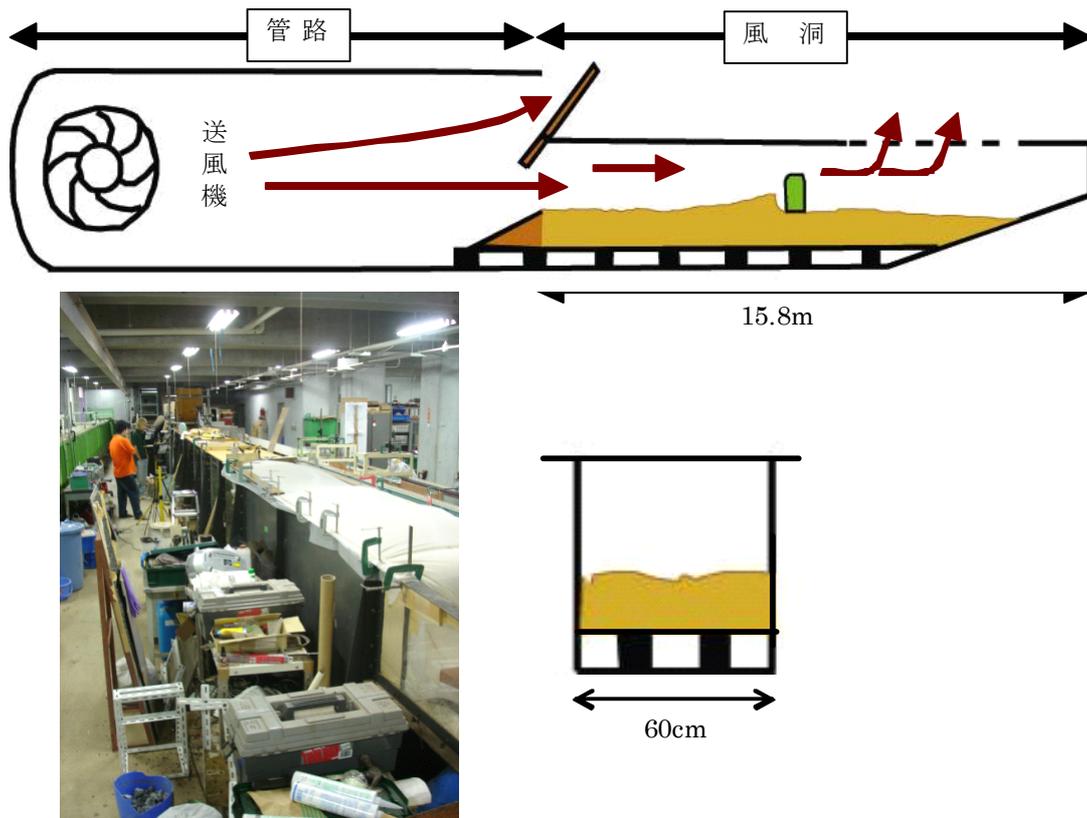


図 13 中型風洞実験装置の模式断面図と下流側からの撮影した全景

を風洞内に留めるための工夫である。なお水路右岸側壁面はガラス製であり、風洞内の様子を観察できる。この実験装置で、風洞内に最大 11m/sec の風を再現できた。

風洞床を 13.5cm 底上げし、その上に厚さ 20cm、長さ 16m にわたり粒径 0.2mm で極めて淘汰の良い豊浦標準砂（以後、砂と記述）を敷いた。この砂で第 3 砂丘列を模した 2 次元的な砂の高まりを作り、その下流側に障害物を設置した（図 14）。障害物としてはコンクリートブロックで三角柱の塊（底面積：190cm²、高さ：20cm）をつくり、これを地山や林などの障害物に見立てた。砂丘列の風下側、風洞の上流端から 7m 下流地点の中央部に障害物を設置した。

本稿では、砂丘列クレストの高さを基準にして、障害物の突出高や凹み深を段階的に変

えて、砂丘列の変形を観察した実験結果を紹介する。なお、風速は 8m/sec で一定とした。実験結果の詳細は小玉(2008)を参照のこと。

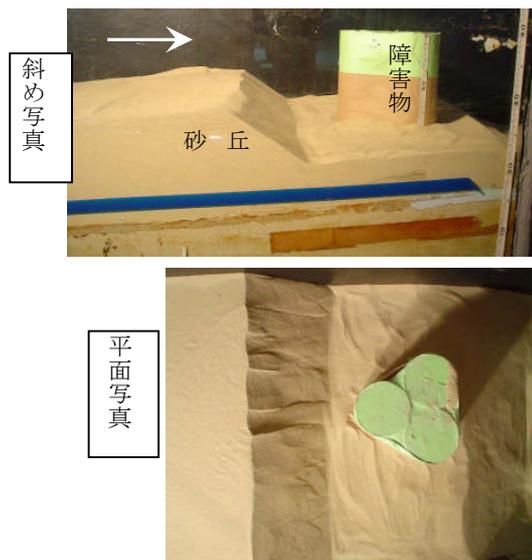


図 14 馬蹄形スリパチ模擬実験の初期状態

障害物が砂丘列クレストよりも突出した場合と凹んだ場合とで、砂丘列の変形が異なった。その代表例を図 15 に示した。

突出した場合には、障害物を取り囲んで下流向きに開いた、追後スリバチに酷似した馬蹄形地形が 15 分～30 分ほどで風洞内に形成され、実験を続けてもこの形態が維持された。

いっぽう凹んだ場合には、砂丘列クレストが前進を続け、障害物を埋積し、スリバチ地形は形成されなかった。

すなわち馬蹄形スリバチの成因には、図 16 に示されるような障害物の周囲で発生する馬蹄形渦が重要な役割を演じていることがわかった。

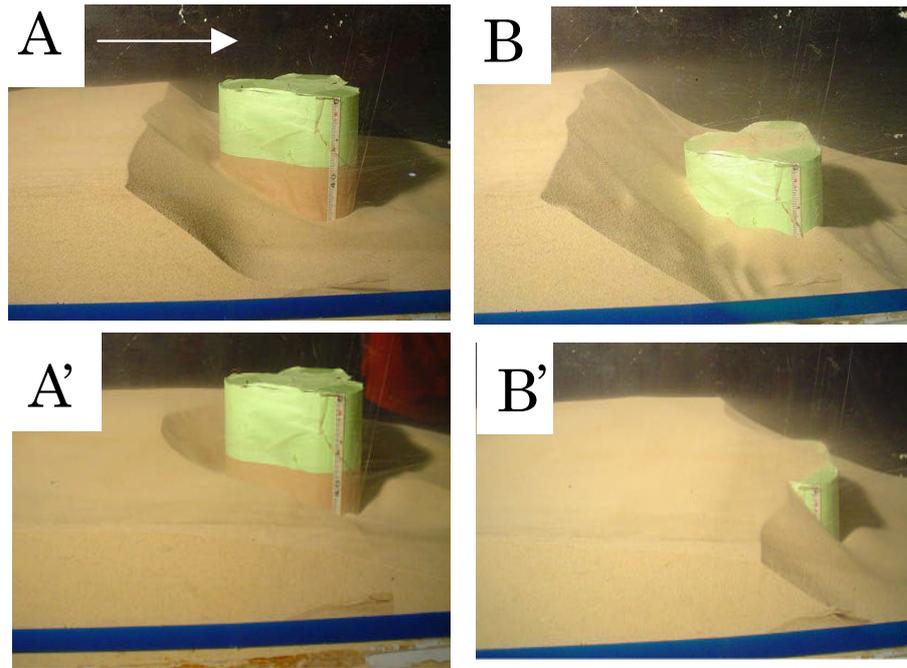


図 15 馬蹄形スリバチの形成実験

A : 障害物を突出 (実験開始直後)、 B : 障害物を凹ませる (実験開始直後)
 A' : 障害物を突出 (通風 30 分後)、 B' : 障害物を凹ませる (通風 25 分後)
 白色矢印 : 風向を示す

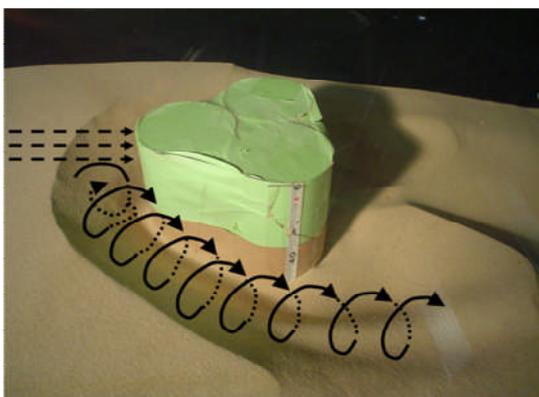


図 16 障害物の周囲で発生する馬蹄形渦の模式図

ii) 追後スリバチ将来像の考察

追後スリバチの現状を観察すると、地山にはえたクロマツが松枯れにあい、平成 8 年 (1996 年) 以降伐採れたことで、結果として 2007 年には図 17 に示されるように、砂丘列クレストの高さよりも明らかに地山の高さが低くなった。

風洞実験の結果からは、このままの状態が続けば、やがて第 3 砂丘列が前進して地山を埋積し、追後スリバチ地形が消滅する可能性

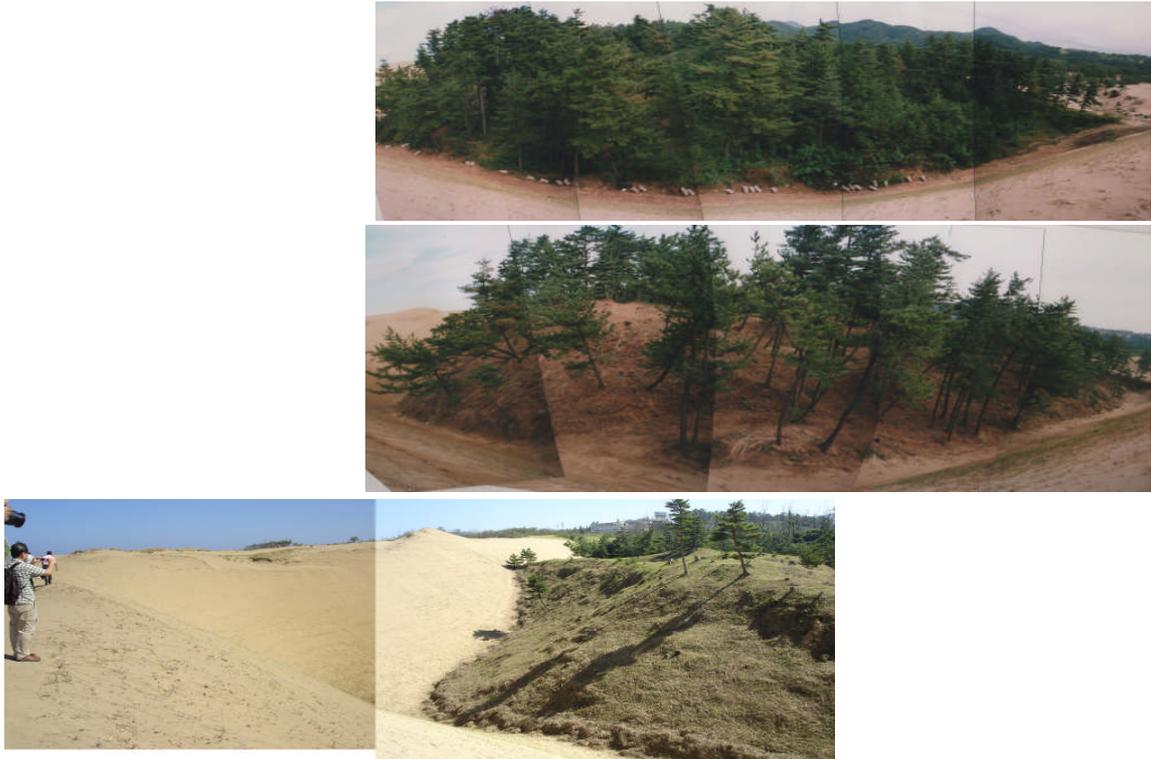


図17 追後スリバチ地山のマツの変遷(1997-2007)

A : マツ伐去作業および間伐除伐作業前(1997. 11. 7. 鳥取砂丘景観管理事業「間伐除伐作業」工事写真より)

B : マツ伐去作業および間伐除伐作業後(1998. 1. 20. 鳥取砂丘景観管理事業「間伐除伐作業」工事写真より)

C : マツの間伐が進んだ追後スリバチ(2007. 9. 20. 撮影)

を指摘できる。実際には、砂丘列の前進速度と地山に回復してくる松林の成長速度との競争であり、上述の風洞実験ほど単純ではない。しかし今後の状況次第では、追後スリバチの地形を保存するために、松林が回復するまでの限定された期間、景観に配慮した木製の壁などを地山の上に設ける対策が必要になるかもしれない。いずれにせよ、注意深く追後スリバチの変形経過を観察することが、今求められている。

iii) 弓形スリバチ

第2砂丘列の長者ヶ庭スリバチなどにみられる弓形スリバチの形成プロセスに関して、2つの観点から風洞実験を行った。ひとつは第2砂丘列の背面に形成される小型砂丘列の凹凸、もう一つは砂丘列のクレストに斜交する

強風である。背面に凹凸をもった砂丘列では、必ず凹部が風下側に突出するためにクレストが湾曲する。同一の飛砂量条件下において、比高の小さい前縁斜面の方が、埋積に要する体積が小さくなる関係で、クレストの前進速度が速くなるからである。しかし、このプロセスのみが継続すると、弓形スリバチから馬蹄形スリバチになってしまう。つまり、弓形を維持する別のプロセスが存在する。

実験装置は自作の平面風洞で、主にコンクリートパネルを用いて作成した(図18)。その全長は4mあり、整流槽:1m長、風洞:3m長の2パーツで構成されている。最上端には、送排風機(Makita, MF302, 出力550w)を2台設置し(図18-A)、それぞれの風速をスライドトランス(リコーRSA-20)により制御し

た。整流槽は幅 90cm、深さ 40cm で、中にナイロンネットを入れて、風の乱れを整えた(図 18-B)。整流槽の中央部に風速計 (AS ONE 製、TA - 361) を設置し、床から 20cm の高さで風速を計測した。風洞のうち実験区間は長さ 1.8m、幅 90cm、深さ 60cm である(図 18-C)。天板および左側面に、透明アクリルパネルを用いることで実験中、内部が観察できるようにした。

風洞の底にコンクリートブロックを敷き詰めることで 10cm 底上げした。この上に厚さ 20cm で、長さ 1.8m、幅 90cm にわたり径 0.2mm の豊浦標準砂を敷き詰め、下流端には高さ 20cm の砂止め堰を設けた。実験区間の下流側は排気区間である。ここでは風洞の天井部に、ナイロンメッシュシート (100cm×4m、目開き 91 μ m・糸径 50 μ m) を設置することで、風洞内から外へ風を逃がし、飛砂を風洞内に留めた (図 18-D)。

実験区間に第 2 砂丘列を模した砂の高まり (砂丘列) を作り、その形状を回転させることで、砂丘列に対する風の進入角度を変化させた (図 19-A, B, C)。砂丘列の平面形に関しては、長者ヶ庭スリバチと同じように弓形に湾曲させた。Bay から Horn までの高低差も現地を模した。具体的には風洞床からの高さは、Bay で約 26cm、Horn で約 22cm、弓形の幅 (Horn1 から Horn2 の距離) は、約 40cm とした。第 2 砂丘列を模擬した砂の高まりは長さ 80cm 前後で作成された。風洞実験では風速を 6.5~7.0m/sec で一定とし、砂丘列に対する風の進入角度を 5 種 (90° , 75° , 60° , 50° , 30°) に変化させた。各実験は 40 分間の通風時間とし、砂丘列の変形を計測した。

風洞実験の結果を図 20 にまとめた。風の進入角度が 50° 以上で砂丘列に直交する場合、

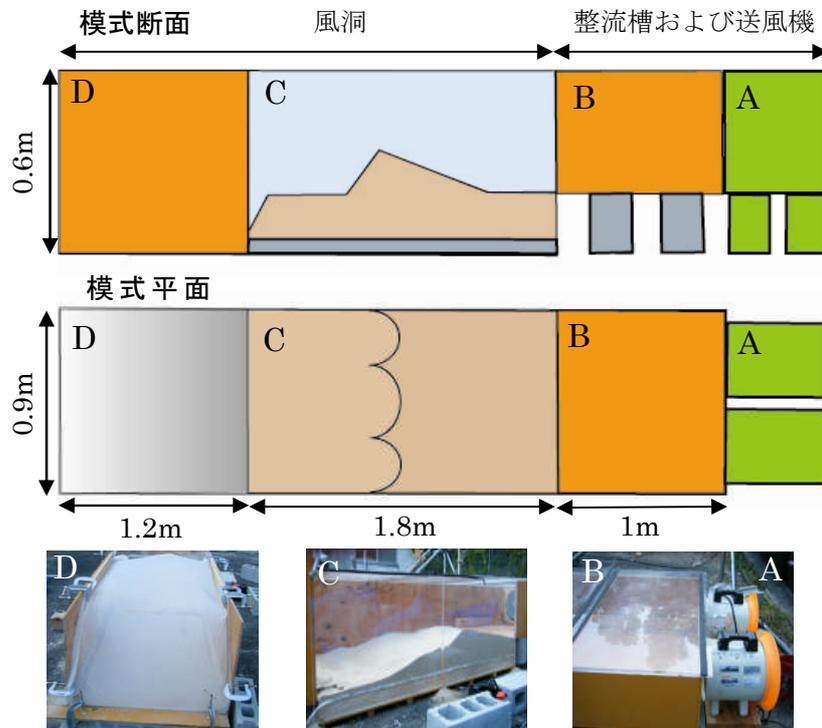


図 18 平面風洞実験装置の模式図と部分ごとの写真

A : 送風機、B : 整流槽、C : 閉管水路、D : ナイロンメッシュシート(下流方向より撮影)

Bay と Horn の移動距離は大きく異なり、時間とともに湾入度が増大した。いっぽう風の進入角度が 50° 未満で砂丘列に斜行する場合には、Bay と Horn の移動距離に差がなく、湾入度が一定に保たれた。つまり、弓形スリバチの形態維持には、砂丘列クレストに対して急角度で斜交する強風が重要な役割を演じていることが示唆された。

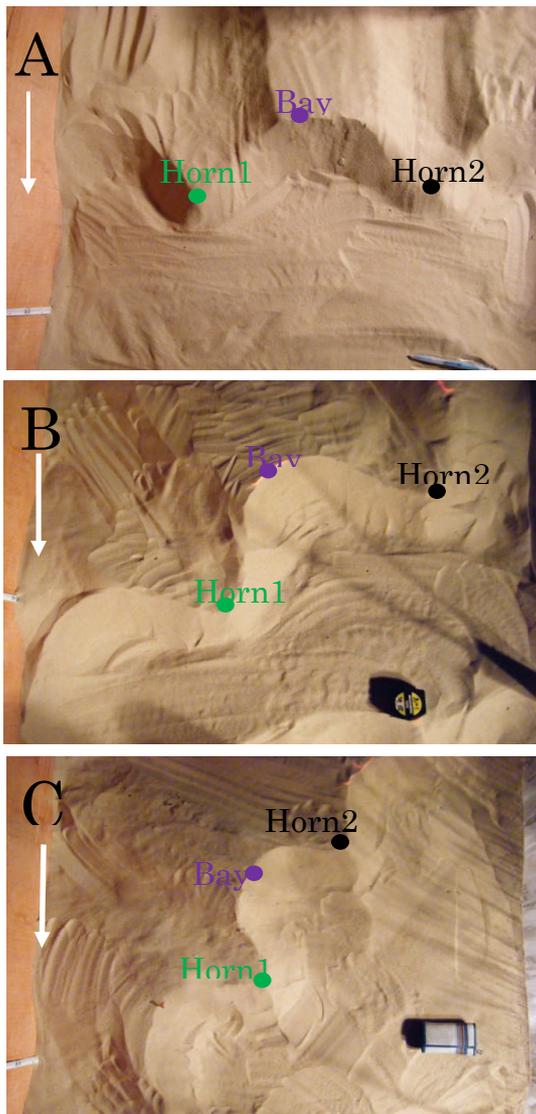


図 19 砂丘列の初期形状を示す平面写真

A : 砂丘列に対する風の進入角度 90°

B : 砂丘列に対する風の進入角度 50°

C : 砂丘列に対する風の進入角度 30°

白色矢印 : 風向

以上述べたスリバチ地形 2 種類の成因に、各スリバチの現況調査結果を加味して、2010 年現在、鳥取砂丘（浜坂砂丘と福部砂丘）にみられるスリバチ地形を図 21 のように再分類した。

青色が活動的な馬蹄形スリバチ、緑色が宅地開発や防砂林植栽などの人工改変を受けたものの、おおよその形態を維持している馬蹄形スリバチ、黄色が活動的な弓形スリバチ、赤色が防砂林植栽などの人工改変を受けたものの形態を維持している弓形スリバチである。

2010 年現在、活動的なスリバチ地形は 3 箇所と貴重な存在であることがわかる。詳しくは田淵（2010）を参照のこと。

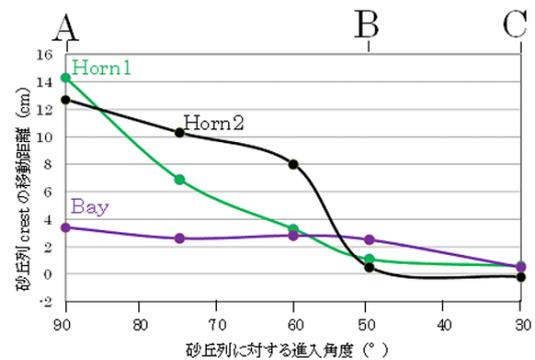


図 20 風洞実験による砂丘列 crest の移動距離

7. 植生繁茂にともなうパラボリックデューンの誕生と成長

鳥取大学乾燥地研究センター敷地内の砂丘地には、現在パラボリックデューン (Parabolic dune, 放物型砂丘) のミニチュア版 (長さ 30m~80m、幅 8m~50m、高さ 3m 以下) がいくつも観察される。パラボリックデューンとは、図 22 に示されるような風下側に凸の U 字型または V 字型の平面形を持つ砂丘形態のことで、中央部は風食凹地 (blowout) となっている。植生との関連で形成される砂丘形態と指摘されている (たとえば Cooke *et al.*, 1993)。

スリバチ地形分類2010の凡例

-  : 現在でも活動している馬蹄形スリバチ
-  : 人工改変を受け、活動していない馬蹄形スリバチ
-  : 現在でも活動している弓形スリバチ
-  : 人工改変を受け、活動していない弓形スリバチ



図21 成因と現況にもとづくスリバチ地形の再分類結果

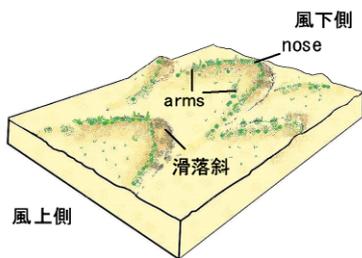


図22 パラボリックデューンの模式図

鳥取県立博物館が1968年以降、5年おきに撮影を続けている鳥取県郷土視覚定点資料（空中写真）を用いて、調査地に判読される砂丘形態の経年変化を調べた。

空中写真を判読した結果、1968年の空中写真では植生のほとんど無い砂丘地が広がっており、パラボリックデューンはひとつも確認できなかった（図23）。

そして1988年にパラボリックデューンがはじめて記録され、この時砂丘地には植生が侵入していた。鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設では、圃場の畦畔や法面の飛砂防止対策としてシナダレスズメガヤを植栽しており、それらが周囲へ拡散した（鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設, 1983）ためと考えられる。

1988年以降パラボリックデューンは分裂派生し、また新たなデューンの形成により数が増えた。

それらはいずれも北に凸形状を示した。調査地域は南向きに傾斜した斜面であり、鳥取平野に面する。東から北、さらに西にかけては防砂林が立地している。このため、春～夏に吹く南風の影響が卓越する場と考えられる。以上のことより、植生の侵入と南風がパラボリックデューンの誕生と成長の鍵を握ることが明らかになった。しかも人の植栽活動との関連で、最近20年余りで誕生し変形を続けてきた比較的若い地形であることも判明した。詳しくは、末房ほか（2009）を参照のこと。

8. おわりに

のべ8名の卒論と修論の研究成果の一部と、田村亨氏との共同研究プロジェクトの一端を紹介した。砂丘に関連する研究テーマは尽きることがない。研究を通じて、砂丘の理解が一步でも深まり、観光、教育や景観保全などに活かされることを願う。

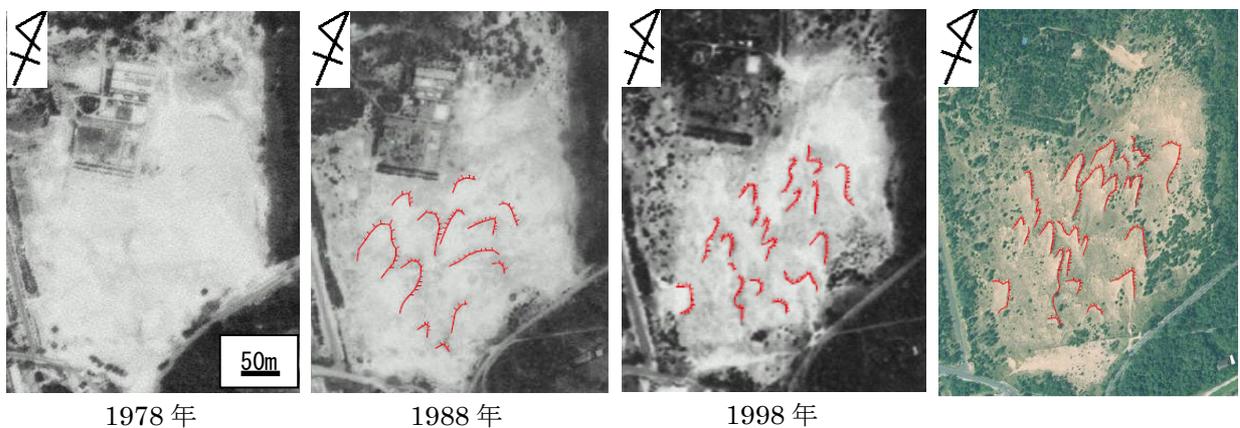


図23 鳥取大学乾燥地研究センター敷地（与謝野晶子の句碑近く）に発達したパラボリックデューン
鳥取県立博物館所有の空中写真を判読したものから4年次分を抜粋。デューン・クレストを赤で記した。

謝辞

天然記念物および国立公園特別保護区域における調査試料採取に関しては、環境省浦富自然保護管の河口誉雄様・鳥取県教育委員会事務局文化財課文化財係の浅田康行様・鳥取市経済観光部観光コンベンション推進課鳥取砂丘室の山根健路様にお世話になった。

風洞実験においては、鳥取大学工学部土木工学科海岸工学研究室の松原雄平教授、黒岩正光准教授に実験施設を使用させていただいた。鳥取県立博物館学芸課人文担当の石田敏紀様には、県博の空中写真の使用に当たり便宜を計っていただいた。

鳥取県砂丘事務所の山本仁志様には、貴重な資料を幾度もご提供いただいた。鳥取大学乾燥地研究センター技術職員の清水知樹様には、当センターの研究利用申請でお世話になった。

本稿で紹介した、sandblastingによる植生管理を目指した基礎実験は西田有公子さんと黒河良江さん、追後スリバチは石川愛さんと田渕直人君、沿岸砂州の規模変遷は藤井まゆらさん、パラボリックデューンは末房身和孩子さんの卒業論文の成果の一部である。また海岸堆積物の粒径変化は川内勇人君、スリバチ地形の分類は田渕直人君の修士論文の成果の一部である。

地中レーダ探査は、独立行政法人 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 沿岸都市地質研究グループの田村亨氏の研究プロジェクト（齊藤有様、渡辺和明様、山口直文様、松本弾様）の成果の一部であり、現地調査では研究室の学生諸君（田渕直人君、祐安宏武君、森井夕加さん、藤井まゆらさん、末房身和孩子さん、川内勇人君、橋高広了君、美藤彩花さん、野口理恵さん、橋本翔平君、河野健一君）と九州大学の鹿島薫氏、石川智氏の協力を得た。

これらの研究には、鳥取砂丘景観保全調査研究会の研究費のほかに、科学研究費補助金（代表：小玉芳敬，課題番号 16500646, 21500998；代表：田村 亨，課題番号 20700675）、鳥取大学乾燥地研究センター共同研究費および平成 21 年度山陰海岸ジオパーク学術研究奨励補助事業（代表：田渕直人）から助成をうけた。

ここに記して御礼申し上げます。

文献

- Bagnold, R. A. (1941) *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London, 265 pp. (reprinted 1954; 1960; 2005, by Dover, Mineola, NY)
- R. Cooke, A. Warren and A. Goudie (1993) *Desert Geomorphology*. UCL Press, 526pp.
- Fryrear, D. W. and Downes, J. D. (1975) Estimating seedling survival from wind erosion parameters. *Trans ASAE*, 18, 888-891.
- 藤井まゆら・小玉芳敬 (2009) 鳥取県郷土視覚定点資料（県博の空中写真）は語る その 5 —鳥取砂丘沖の浅海底に発達する沿岸砂州の変遷—。鳥取地学会誌, 13, 65-70.
- Gibbs, R. J., Matthews, M. D. and Links, D. A. (1971) The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41, 7-18.
- 川内勇人・小玉芳敬 (2010) 鳥取砂丘沿岸の砂浜堆積物にみられる粒度組成の東西変化。鳥取大学地域学部紀要 地域学論集, 6(3), 325-332.
- 小玉芳敬 (2002) 鳥取県郷土視覚定点資料（県博の空中写真）は語る その 3 — 沿岸砂州の規模縮小と鳥取砂丘の草原化 —。鳥取地学会誌, 6, 35-42.
- 小玉芳敬 (2006) マルチ・スケールでのぞむ鳥取砂丘の草原化対策。鳥取大学地域学部紀要 地域

- 学論集, 3(2), 239-245.
- 小玉芳敬 (2008) 平成 16～平成 19 年度科学研究費補助金 基盤研究 (C) (2) 課題番号: 16500646 研究成果報告書 『地形構成材料からみた海岸砂丘の形成史と形態特性』 111pp.
- 小玉芳敬 (2009) 地表面プロセスから探るランドスケア. 岡田昭明編「地域環境学への招待 人と自然の共生・地域資源の活用をめざして」, 15-22.
- 黒河良江 (2008) Sandblasting を利用した鳥取砂丘草原化対策. 鳥取大学地域学部平成 19 年度卒業論文, 33 pp.
- 成瀬元 (2005) 沈降管天秤法粒度分析用アプリケーション”STube” の特色と利用法. 堆積学研究, No. 62, 55-61.
- 西田有公子 (2007) Sandblasting による植生制御の基礎実験—鳥取砂丘の草原化対策に向けて—. 鳥取大学教育地域科学部平成 18 年度卒業論文, 48 pp.
- Ogura, A and Yura, H (2008) Effects of sandblasting and salt spray on inland plants transplanted to coastal sand dunes. *Ecol. Res.*, 23, 107-112.
- 末房身和子・小玉芳敬・河合隆行 (2009) 鳥取県郷土視覚定点資料 (県博の空中写真) は語る その 4 — 鳥取大学乾燥地研究センター敷地内砂丘地に発達したパラボリックデューン —. 鳥取地学会誌, 13, 59-63.
- 田淵直人 (2010) 形成プロセスから見直す鳥取砂丘スリバチ地形の分類. 鳥取大学大学院地域学研究科平成 21 年度修士論文, 45pp.
- 田村亨・小玉芳敬・齋藤有・渡辺和明 (2009) 鳥取砂丘の地中レーダー断面. 日本地球惑星科学連合 2009 年大会要旨集, Q145-P010
- 徳田貞一(1917a) バルハンとスリバチ(第 1 稿). 地質学雑誌, 24, 6-11.
- 徳田貞一(1917b) バルハンとスリバチ(第 2 稿). 地質学雑誌, 24, 45-54.
- 徳田貞一(1917c) バルハンとスリバチ(第 3 稿). 地質学雑誌, 24, 121-130.
- 徳田貞一(1917d) バルハンとスリバチ(第 4 稿). 地質学雑誌, 24, 309-322.
- 鳥取県(1929) 鳥取懸史蹟名勝天然記念物調査報告 第 3 冊 名勝及天然記念物の調査, 151pp.
- 鳥取県 (2005) 「みんなで守り・創り・育てる海辺 鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドライン」. 鳥取県県土整備部河川課
- 鳥取県 (2006) 「みんなで守り・創り・育てる海辺 鳥取沿岸の総合土砂管理ガイドラインに基づく人為的な土砂移動等の実施状況のモニタリング実施要領」. <http://www.pref.tottori.lg.jp/secure/222632/jissiyouryou.pdf> (2010.01.11 閲覧)
- 鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設 (1983) 「砂丘利用研究施設 25 年の歩み」鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設, 77pp.