

砂嘴の形成と侵食に関する研究—天橋立海岸について—

陳 活 雄*・岩 垣 雄 一**

1. 緒 言

我が国の砂嘴地形海岸の多くは侵食の危機にさらされ、かつての砂浜豊かな海岸の復旧整備とその安定化が急がれている。日本三景の一つである京都府の天橋立海岸もその例にもれず、現在は対策が功を奏して回復したが、一時期は白砂青松の優美な砂嘴海岸が20数mの幅にまで細り、場合によっては切断されるのではないかと心配された時もあった(矢島ら, 1982)。

この研究は、典型的な砂嘴海岸である天橋立海岸の侵食制御の方法を検討するに当たり、この砂嘴の形成機構を明らかにし、それを基礎として侵食の原因を考察したものである。

2. 砂嘴の形成機構

天橋立海岸は、典型的なサンドスピット(砂嘴)海岸であり、図-1に示すように、宮津湾の奥に近い場所において、江尻地先から湾軸の方向に向かって細長く伸び、阿蘇海と宮津湾を隔てる湾央砂州である。

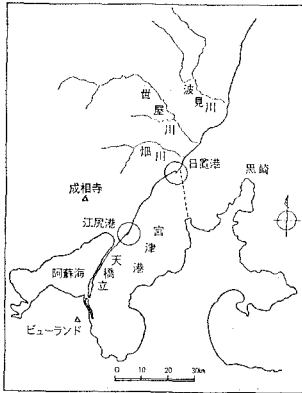


図-1 天橋立海岸周辺

この砂嘴は、江尻付近を起点として徐々に成長、発達し、現在の姿になったわけであるが、この過程は波浪および沿岸流による漂砂の輸送と堆積によるもので、そこには漂砂源の存在と波浪が江尻付近より湾奥に侵入するための一定の水域条件が不可欠である。このうち、後者については海水面の経年変化が重要な要因となる。

本節は、天橋立海岸の生成の歴史、即ち砂嘴形成の歴史に関して、海岸工学的あるいは、地形学的立場から、

その発達過程を明らかにする。そして、砂嘴地形海岸における侵食制御という今日的課題に対処するために、天橋立誕生前の地形、即ち原地形を推定するとともに、その後の砂嘴の発達をもたらした沿岸漂砂量を推定し、これらと波浪特性及び地形変化特性との関連を考察して砂嘴形成機構を明らかにする(岩垣ら, 1989, 1990, 1991; 岩垣, 1991)。

(1) 海水面の経年変化と漂砂の輸送

地質年代的な長い時間スケール(long-term)でみた海水面の変化は、氷床の消長による海水準変動として、日本の平野の堆積層形成の重要な要因とされているが、海岸地形においても海岸段丘の形成等と関係が深い(平, 1990; 中野, 1974; 中野ら, 1987)。

氷床の消長によれば、現在は氷床の退いた時期にあたり、氷床が大きく発達した時期(氷河期)には、最も近いところで、25,000年前には現在より120mほど海面が低かったといわれている。

小谷(1966)は海水面の変化に着目し、天橋立の成因について、縄文時代前期の海水位が高かった頃、砂礫が江尻から橋立明神(大天橋先端付近の幅の広いところ)あたりまで堆積し、4,400~3,000年前の水位が下がったところに天橋立の原形が海上に現われたのではないかと説明している(地学団体研究会, 1976)。しかし、これによると、その後の漂砂の堆積による砂嘴の前進、発達過程が説明のできないので海岸工学的には十分納得できる形成機構とはいえない。ただし、小谷の指摘は、橋立の砂嘴が何時頃から形成を始めたかを説明するには、海面の変動を同時に考慮に入れなければならないという示唆を与える点で注目される。即ち、海水面の上昇による海面の出現は、湾水域の形成にとって不可欠であり、さらに波浪の侵入がなければ、またそこへ土砂を流出する河川がなければ、砂嘴形成に寄与する漂砂自体が存在しないわけである。このことから海水面の変化は漂砂をもたらす外力(波浪、沿岸流)のみならず、漂砂特性をも変えることになり、それらの影響範囲は、おのずから限定されることとなる。

図-2は約1万年前から現在に至る日本各地の海面変化(杉村, 1979)を示したもので、場所によって多少の

* 正会員 工修(株)ニュージェック 水工部長

** 正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科

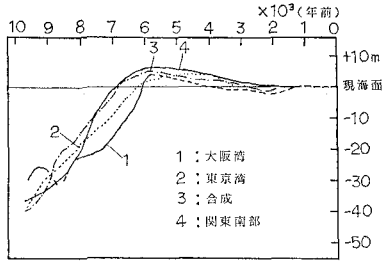


図-2 日本各地の海面変化 (杉村, 1979)

違いはあるが、傾向は全く似ている。すなわち、1万年前は現海面より -40m 程度のところに海面があり、年間 1.0~1.3 cm 位の速度で海面が上昇を続け、大よそ 6,000~7,000年前に現海面に達したが、上昇速度が遅くなり最高位になったあと次第に下がって、現在の海面に近づいている。

この海面上昇は一般に縄文海進とよばれているが、最高水面は人によって意見が異なり、0mであるという人や5~6mあったとする人もいようである。ここでは、主として図-3に示す富山湾での海面変化(藤井, 1982)の知見を基にして、以下過去1万年間における宮津湾内の漂砂の輸送について考察する。

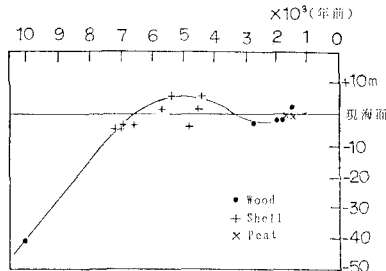


図-3 富山湾の海水面変化 (藤井, 1982)

1) 1万年前~9,000年前は、海面は -40m~-30m 付近であったから、現在の海底地形を示す図-4からわかるように、宮津湾内は陸上で、汀線は湾口にあった。

2) 8,000年前頃は、海面が -20m 程度であるから、汀線は湾内に侵入し、野田川および大手川の河口入江が出現した。そのときの湾口幅は 1 km 以下で、日本海の波浪は侵入しても波高は小さく、顕著な漂砂はなかった。

3) 7,500~6,500年前頃はこれまでの上昇速度を鈍化させながら海面は -15m から現海面の 0m に上昇し、野田川および大手川の河口は後退して、汀線は湾奥にまで達するとともに、湾口も 1.5~2.0 km に拡大して、波浪が容易に侵入するようになった。

4) 6,500~3,000年前頃は、現海面に達したのち、さ

らにゆっくりと上昇を続け、5,000年ほど前に最高位(約 +5.0m 前後)になった後、次第に下がって現海面にもどった期間で、したがって海面が 0~+5.0m の時代が約 3,500 年続いたことになる。この期間は大きな波浪の湾奥方向への侵入がさら

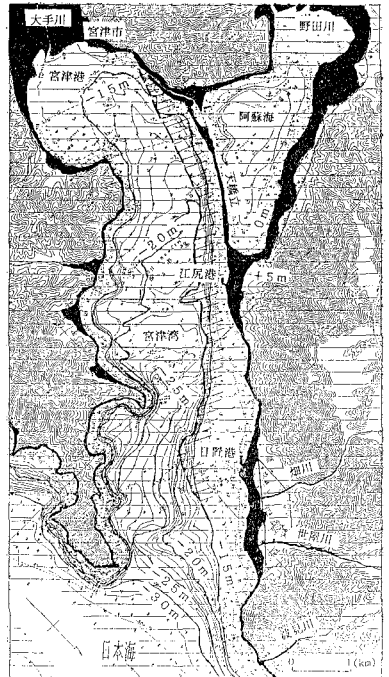


図-4 現在の天橋立付近の地形

に容易となり、漂砂の輸送もより活発であった。漂砂源より天橋立に至る漂砂の輸送路はこの頃に出来たものと推測される。図-4で黒く塗りつぶした部分は 0m~5.0m の地域であるが、湾の西岸に沿って、世屋川河口から江尻地先を迂回するように経路して阿蘇海沿岸につづくこの地域に形成されている海岸段丘は、この時代のものではないかと思われる。

5) 3,000年前頃以降は、いったん現海面以下(最低 -2~-3m 前後)になり、再び上昇して約1,500年前に現海面に至り、ほぼその状態で今日におよんでいる。初期の海面の低下は上述した海岸段丘(漂砂輸送路)の一部が水面上に現われ、その途中、とくに江尻地先の平地地形が海へ突出する領域において、波浪の変形が微妙に変わって、阿蘇海への侵入波の波高が減少する結果となった可能性がある。

もし、これが事実とすれば、この時期の漂砂源より湾奥に向う漂砂移動はひきつづき継続していることから、江尻地先において天橋立の基部が形成され始めたのも、この時点であると想定される。すなわち、約3,000年前に再び海面が現海面と同じ位まで下がったときに、天橋立の芽が形成されたと考えられる。

(2) 原地形の推定

天橋立の砂嘴地形が形成される以前の、かつ海岸段丘の存在しなかった時期の地形を推定する。これを図-4の現在地形から推定するために、上述の海水面位置と漂

砂輸送の考察をもとに、次の二つの仮説をおく。

1) 湾口から波が侵入し、漂砂が顕著になったのは、水深 -15m の位置が汀線であった年代以後で、およそそれより 5m 深い -20m 以浅の部分が漂砂による地形変化領域である。

2) 縄文海進の時期に、海面は最高 +5m まで上昇し、海面が 0~+5m の時代が3,500~4,000 年程度継続した。図-4 の黒く塗った 0~+5m の領域を含め、波による漂砂堆積作用によって、現在までに +5m から -15m 付近までに段丘が形成されている。また、天橋立の砂嘴は縄文海進の時期以降に形成された段丘である。

このような仮説の下に原地形を推定したのが図-5であって、この図の点線で表わした等深線の領域は、図-4の破線と斜線を施した以浅の部分の地形を変えて示したものである。この時の段丘と砂嘴部分は図-6で黒く塗りつぶしたようにカ

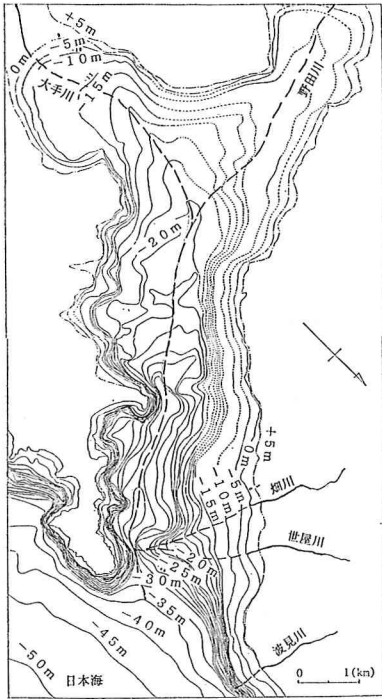


図-5 宮津湾の原地形推定図

ットし、原地形の断面形状を推定した。したがって約1万年~9,000年前には、湾内奥部の流入河川である大手川、野田川の両河川は、図-5の破線のように流れてい

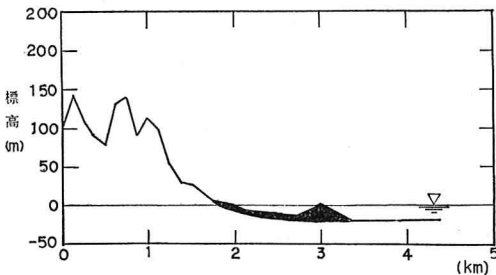


図-6 原地形の推定断面形状 (段丘と砂嘴をカット)

たと考えられ、もしこれらの河川からの流出土砂の堆積による海底地形の変化を考えなければ、前述したような段丘も天橋立の砂嘴も存在しない地形は、ほぼ約 7,000 年前頃まで維持されたと推定される。

(3) 年間の沿岸漂砂の推定

いま、この湾の西岸を湾奥へ向う年間の沿岸漂砂量を推定する。ここで、図-4の現在地形と、図-5に示す約7,000年前の段丘形成以前と推定される地形との差をとって堆積土量を算出してみると、約3,000万m³となる。したがって、7,000年前から漂砂による段丘地形の形成が始まったとすれば、年間当りの堆積量は $3,000 \times 10^4 / 7,000 \approx 4,300 \text{ m}^3$ 、もし、6,500年前からとすると約4,600m³となる。一方、日置港および江尻港における昭和44年から平成2年までの年平均浚渫土砂量は、それぞれ3,400m³と1,100m³、合計4,500m³であって、上述の値とほぼ一致している。この事実から、宮津湾の少なくとも約7,000年前の姿は、図-5に示すような地形であったのではないかと推定される。つぎに、天橋立海岸の砂嘴本体の形成、発達過程からの漂砂量の推定を試みる。前述したように、海水面の変動と段丘の形成過程を手掛りに、砂嘴本体の形成開始時期は約3,000年前頃と推定される。その後の発達過程については、実景を表現した唯一の歴史資料と考えられる、図-7に示す有名な雪舟筆「天橋立図」(国宝)(1500年頃)が参考になる(岩崎, 1975)。これによると、小天橋は描かれておらず、約500年前には砂嘴が約2,000m成長し、その先端が「橋立大明神」地先付近まで形成されていたことがわかる。いま、砂嘴の断面形状は現在とほとんど変わらない

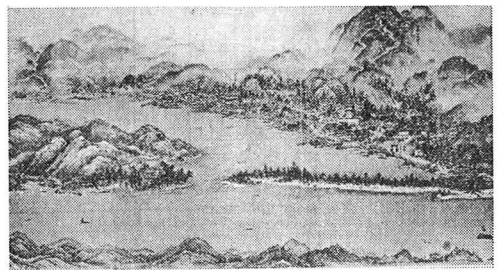


図-7 500年前の天橋立 (雪舟筆)

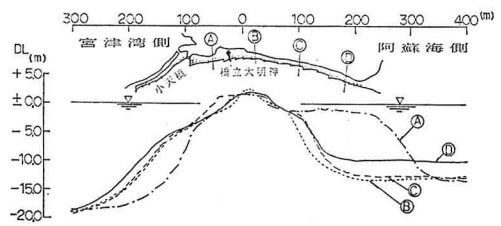


図-8 砂嘴の断面形状

いとすると、最近の測量によれば図-8のようであって、平均堆積断面積は $6,000 \text{ m}^3/\text{m}$ で、砂嘴の堆積量は $1,200 \text{ 万 m}^3$ となり、堆積期間を $3,000-500=2,500$ 年と仮定すると、年間当り漂砂堆積量は約 $4,800 \text{ m}^3$ となる。このことは、天橋立海岸が砂嘴として形成された過程において、これに寄与した漂砂量が、もし上述の両港がなければ、現在の天橋立海岸に対する漂砂量規模とはほぼ等しいという興味深い結果を示している。これはまた、天橋立海岸が砂嘴という形の自然海浜として形成されるに至った重要な自然営力特性の一つであるといえる。

(4) 砂嘴の形成機構

砂嘴の形成は、漂砂輸送とその堆積作用によるが、天橋立の砂嘴形状の特徴は、しばしば陸の方へ曲る三保の松原の例にみるような鉤状砂嘴 (recurved spit) とは違って、単純砂嘴に分類され、細長い宮津湾の長軸方向に江尻地先から南 (湾奥) に真直ぐにのびた細長くて simple な姿にある。漂砂輸送に関しては、まず漂砂源が問題となる。湾の東岸 (天橋立対岸) には漂砂源となる河川はないが、天橋立の位置する西岸には、湾口に近い所から、波見川 (流域面積 10.4 km^2)、世屋川 (16.3 km^2)、畑川 (6.2 km^2) があって土砂を排出している。これらの土砂が漂砂として挙動するためには、河口部へ作用する波浪の存在が前提となるが、これには前述したように海水面の変動、したがって湾の形成と波浪の侵入が重要な要因となる。

つぎに、このような漂砂現象は波浪外力を主体とする海象特性によってその特性が規定されるが、とくに対象海岸への波の入射方向が漂砂の卓越方向を定める。この点を宮津湾西岸のいわゆる wave window (鮮干ら, 1985) を描いて検討すると、場所によって若干の相違はあるが、江尻地先付近では図-9 に示すように、 $N+43^\circ \text{ E} \sim N+60^\circ \text{ E}$ (帯域幅は約 17°) となり、天橋立海岸へ侵入できる波浪はほとんど NE からの波に限定されることがわかる。このような地形特性のため外海から来襲する波浪は、湾の長軸に沿って伝播するが、その途上

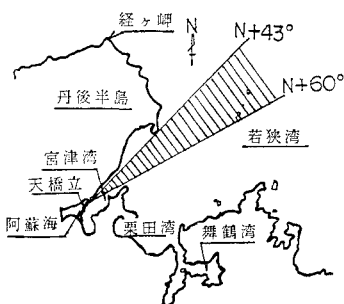


図-9 天橋立海岸の wave window

における波浪変形について特記すべきことは、図-10に示す屈折特性から理解されるように、いずれの海岸地点においても波が一方から斜めに入射することである。したがって、海岸に沿って湾奥に向う方向性の卓越した波浪に伴う沿岸流が漂砂を天橋立海岸に供給することになる。砂嘴の形成過程における漂砂の堆積作用は、いわゆるダムの堆砂のそれと類似の現象であって、砂嘴の先端水深が十分深いため漂砂の輸送能力が急減し、沈降堆積することにより、先端部が徐々に前進することになる。推定原地形によれば、天橋立海岸が形成される以前は、砂嘴が伸長する地点の水深は $15 \sim 20 \text{ m}$ であった。

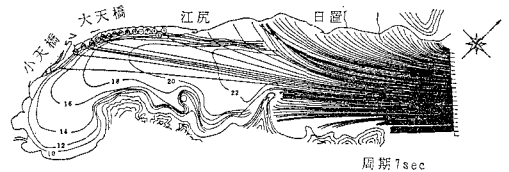


図-10 湾内侵入波浪の屈折図

3. 砂嘴地形の侵食

天橋立海岸の侵食が取沙汰されるようになったのは、昭和20年代後半以降で、昭和38年頃には非常にやせ細った状態となり、かなり侵食にみまわれた (矢島ら, 1982)。この侵食の要因として、漂砂源の変化があり、二つの原因が考えられる。一つは、流入河川の昭和十年代から始まった治山治水工事による流出土砂量の減少、もう一つは、昭和28年から38年にかけて築造された日置および江尻両港の防波堤による漂砂の遮断である。

しかし、海岸段丘の形成や砂嘴の成長におけるマクロな土砂収支にもとづく前述の漂砂量推定結果と現在の両港における堆積 (浸没) 土砂とがほぼ匹敵することからいえば、構造物設置による、土屋 (1987) のいう2次的な助長要因が当海岸における侵食の主な原因といえる。即ち、砂嘴の形成が一方方向的な沿岸漂砂によることから、漂砂上手におけるこの種の構造物の設置による漂砂遮断が下手側に位置する海岸の侵食を余儀なくするといわざるをえない。

したがって、当海岸における侵食制御は、このことを踏まえて考えるべきであって、土屋 (1987) も強調するように、漂砂の連続性に基づけば、沿岸漂砂を人為的に遮断したことになるので、必ずサンドバイパスしてその接続を図るべきであろう。なお、天橋立海岸におけるサンドバイパス工法の導入については、かつて著者らの一人らがその必要性を指摘したことがある (石原・岩垣ら, 1957)。その後突堤工法および養浜との併用により、現

在ではすでに試験施工から本格的実施に入り、ふっくらとした美しい砂浜が形成されつつある(黒田, 1985; 京都府, 1987).

4. 結 語

きわめて長い時間スケール(10⁸年のオーダー)でみた砂嘴地形の形成過程を天橋立海岸の場合について考察したが、その結果を要約すると次のとおりである。すなわち、約7,000年前の地形を推定し、現状の地形との差をとって、年間平均の堆積量を求めると、現在の年間の沿岸漂砂量(日置, 江尻両港での年間平均浚渫土砂量)とよく一致すること、また、約3,000年前に天橋立海岸砂嘴形成の芽ができ、その後約2,500年を経た約500年前の天橋立は、今の橋立明神付近まで約2,000mに成長し、この間の年間の堆積量も現在の沿岸漂砂量とほぼ同じであることがわかった。このような砂嘴の形成には漂砂源としての流入河川の土砂供給があり、これを沿岸漂砂として輸送する一方向性の卓越した波浪の侵入と沿岸流の発達と考えられること、さらに砂嘴の成長発達には、漂砂の継続的な堆積作用が行われる一定の水深の場所が存在したことなどを考察した。

また、この砂嘴海岸が侵食を受けて、切断される恐れがあったこと、その原因は漂砂の上手側における治山治水による漂砂源の減少もあるが、主として港湾が構築され漂砂源が遮断されたためであることなどを明らかにし、この海岸の侵食制御のあり方を検討するための重要な結論を得ることができた。

最後に、この研究は著者らが長年運輸省、京都府による天橋立海岸侵食対策調査に関係した中で生まれたもので、両機関より種々のご支援とご配慮を頂いたことに対し謝意を表す。また、この研究の一部は名城大学の卒業研究として実施したもので、関係学生諸君に負うところが多い。さらに、本論文作成にあたって京都大学防災研究所土屋義人教授より有益なご助言を得た。ここに記

して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 石原藤次郎・岩垣雄一・榎木 亨・小合彬生(1957): 宮津海岸の漂砂に関する調査報告書, 京都府土木部河港課, pp. 1-75.
- 岩垣雄一(1991): 日本三景天橋立の誕生から現在まで, 第305回建設技術講習会テキスト<上下水道>, (社)全日本建設技術協会・京都府, pp. 13-24.
- 岩垣雄一・陳 活雄(1991): 日本三景天橋立の生成とその発達過程の研究, 土木学会第46回年次講演会概要集, 第2部, pp. 1040-1041.
- 岩垣雄一・下谷敏之・陳 活雄(1990): 地形の立体図化による天橋立海岸の生成過程の研究, 土木学会中部支部年講, pp. 194-195.
- 岩垣雄一・陳 活雄(1989): 天橋立海岸の生成過程に関する研究, 土木学会第44回年次講演会概要集, 第2部, pp. 778-779.
- 岩崎英精(編集者)(1975): 丹後の宮津一史跡と名勝をめぐる一, 天橋立観光協会, 256 p.
- 京都府港湾事務所(1987): 宮津港天橋立海岸侵食対策調査報告書, pp. 1-70.
- 黒田秀彦(1985): 甕える天の橋立, サンドバイパス工法調査報告, みなとの防災, 第78号, pp. 17-26.
- 小谷聖史(1966): 天橋立について, 京都府立宮津高等学校研究紀要, 第2号, pp. 27-40.
- 杉村 新(1979): 海面変動—地球物理学と地形学・地質学との接点—, 月刊地球, Vol. 1, No. 11, pp. 816-821.
- 鮮干 徹・Seymour, R. J. (1985): 1983年冬期におけるカリフォルニア海岸の異常災害, 土木学会誌, Vol. 70, No. 3, pp. 59-64.
- 平 朝彦(1990): 日本列島の誕生, 岩波新書, 岩波書店, 226 p.
- 地学団体研究会(京都支部編)(1976): 京都五億年の旅, 法律文化社, pp. 147-150.
- 土屋義人(1987): 海岸侵食の制御, 土木学会論文集, 第387号, II-8, pp. 11-23.
- 中野尊正・式 正英(1987): 地形の教室, 古今書院, 267 p.
- 中野尊正(1974): 日本の地形, 築地書館, 362 p.
- 藤井昭二(1982): 海底埋没林と海水準変動, 中部土壌肥料研究, 第56号, pp. 1-9.
- 矢島道夫・上蘭 晃・矢内常夫・山田文雄(1982): 天橋立におけるサンドバイパス工法の適用, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 304-308.