

松原海岸の地形変化特性

島田 敬*・山口 豊**・片野明良***

1. はじめに

福井県敦賀湾の奥部に位置する松原海岸は、約1.5 kmの砂浜と、背後40 haに平均樹齢約200年のアカマツ、クロマツが約17,000本茂る気比の松原を有する白砂青松の海岸景勝地である。松原海岸の東に隣接して敦賀港が1975年までに建設されており、さらにその北側に敦賀新港が1983年に着工となり、現在もその建設工事が進められている。気比の松原は日本三大松原の一つであり、砂浜と一体で保全していかなければならないものである。このため、港湾の建設は、海岸の状態を慎重にモニターしながら進めてきている。

本報告は、環境と調和した今後の港湾整備に活かすために、1960年から現在に到る松原海岸の変形を空中写真の解析結果や深浅図を経験的固有関数で解析した結果等(運輸省;1995)をとりまとめたものである。

2. 自然条件と港湾建設の経緯

(1) 自然条件

図-1に松原海岸の位置図を示す。松原海岸は、若狭湾内のリアス式海岸で作られた小湾の一つである敦賀湾の

湾奥に位置する。松原海岸の東には敦賀港があり、さらにその北では、現在、敦賀新港が建設されつつある。

松原海岸は、非常に奥まったところに位置するために、日本海からの冬季高波浪でも当海岸に伝播する間に波高1.0 m以下に減衰するものがほとんどであり、波高が1.5 m以上になる率は0.1%程度である。図-2は、敦賀港で観測(観測地点は図-1、参照)された月最大有義波高の経年変化である。過去17年間に、有義波高2 m以上の波が観測されたのは、1978年、1982年、1991年の冬季のわずか3シーズンにすぎない。なお、日本海に面するために潮位変動は少なく、潮差は48 cmである。

図-3は、松原海岸の海底地形である。海岸中央の広い範囲に渡って等深線が平行となる二次元性の強い海底地形である。海底勾配は水深5 mまでが約1/10であるのに対し、10 m以深では非常に緩やかで1/100程度となっていて、沿岸砂州は形成されていない。本海岸の東西端には、筈の川と井の口川が流入している。地形図(2万

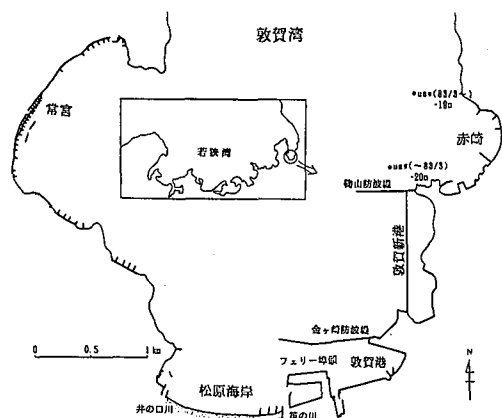


図-1 敦賀港と松原海岸

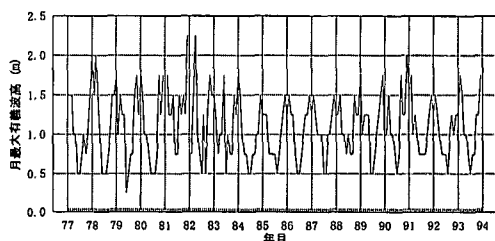


図-2 月別最大有義波高

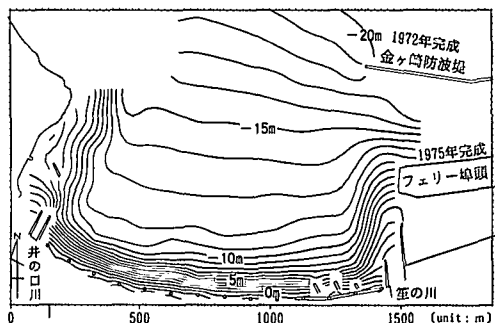


図-3 松原海岸の深浅図(1994年3月)

* 正会員 運輸省第一港湾建設局敦賀港工事事務所長
 ** 運輸省第一港湾建設局敦賀港工事事務所建設専門官
 *** 正会員 (株)エコー第一技術部解析調査課

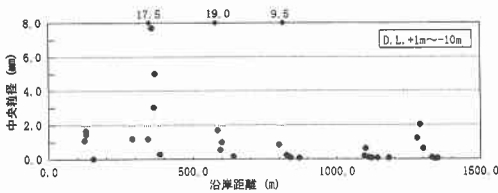


図-4 中央粒径の沿岸方向分布

5 千分の 1) から両河川の流域面積を求めると、笙の川が 165 km², 井の口川が 29 km² となることから、海岸への土砂供給量は笙の川の方が 1 オーダー多いと考えられる。このことは、笙の川河口全面の等深線が沖に張り出していることからもうかがえる。(図-7 参照)

図-4 は、1977 年に調査した結果(福井県; 1977)に基づいて、底質の中央粒径の沿岸方向分布を示したものである。ただし、岸沖方向 D.L. -10 m ~ +1 m の範囲について重ねてある。なお、横軸沿岸距離は図-3 に対応している。中央粒径は沿岸距離 350 m 付近で大きく、両サイドに向かって小さくなる傾向がある。また、沿岸距離 350 m 付近と 600 m 付近, 800 m 付近でそれぞれ 17.5 mm, 19.0 mm, 9.5 mm という非常に大きな粒径が現れている。これらはいずれも汀線付近から採取された底質である。

(2) 港湾建設の経緯

松原海岸の東側に隣接する敦賀港(図-3 参照)の金ヶ崎防波堤の屈曲部より先およびフェリー埠頭の建設は 1970 年に着工となり、それぞれ 1972 年, 1975 年に完成している。その後、現在に至るまで新たな外郭施設の建設は行われていない。

図-5 は、敦賀港の北側に建設されている敦賀新港(図-1 参照)の建設状況である。新港は、1983 年から外郭施設である鞠山防波堤の建設に着手し、翌年から岸壁を両端から延伸させている。岸壁は、1987 年までに 1140 m 延伸しほぼ完成している。鞠山防波堤は 1987 年には、約 500 m 延伸され、1994 年に総延長 919.3 m となっている。

3. 松原海岸の長期的な地形変化

松原海岸の長期的な地形変化を、汀線については航空写真、海底地形については深淺図を用いて把握した。

航空写真は、1947 年の米軍撮影と、国土地理院撮影とを合わせ、1990 年までの間、計 6 回撮影されている。写真-1 は、1963 年, 1974 年及び 1990 年の空中写真である。これらの写真の比較をすると、最近、松原前面の砂浜幅が狭くなっているように見えるが、1974 年, 1990 年の撮影が秋であるため、松林の影が砂浜にかかっていて見かけ上狭くなった印象を与える。そこで、汀線位置を

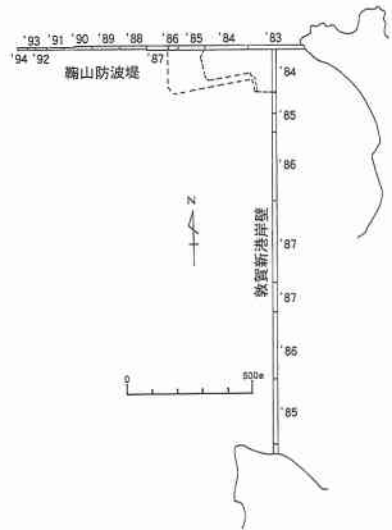


図-5 敦賀新港の建設経緯

デジタイザで読み取り、比較することにした。

図-6 は、1963 年の汀線位置を基準にして、1974 年および 1990 年までの汀線変化を示したものである。ただし、潮位変化が小さく、前浜が急勾配(約 1/10)であることから、潮位補正は行っていない。1974 年までの汀線変化を見ると、汀線は全体に前進しつつ、局所的には井の口川近くで後退、笙の川近くで前進していることが分かる。1990 までの変化に注目しても、ほぼ同じ傾向が読み取れる。つまり、松原海岸の汀線は 1963 年~1974 年の間で生じており、その後 1990 年までの変化は少ないことになる。

図-7 は、1960 年, 1982 年, 1994 年の等深線を-5

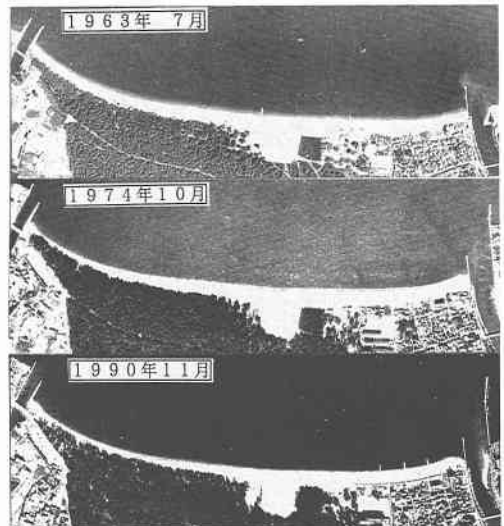


写真-1 航空写真(1963年, 1974年, 1990年)

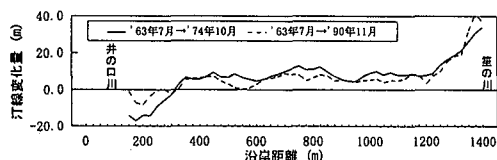


図-6 航空写真から読みとった汀線形状の比較

m, -10 m, -15 m について比較したものである。1960年から1982年の間に、-5 m と -10 m の等深線は、沿岸距離 200 m ~ 1200 m の範囲において後退し、沿岸距離 1200 m 以上のところ(笹の川の河口前面)で、沖に張り出すように変化した。しかし、その後 1994 までのこれらの等深線の変化は全域に渡って非常に少ない。つまり、海底地形においても、汀線変化と同様に解析期間の前半での変化が大きく、後半の変化は少ない。なお、水深 -15 m の等深線については、全期間を通じて有為な変化は認められない。

前半の堆積が生じている沿岸距離 1200 m 以上の範囲について、堆積土量を計算した結果は 22 年間 (1960 年 ~ 1982 年) で 140,000 m³ である。海岸中央部の等深線後退が認められたことから、中央部から運ばれた砂が河口前面に堆積したものと判断される。一方、笹の川からの流出土砂の正確な量は把握できていないが、後述するように、河口維持浚渫量から推定して 1,000 m³/year 程度と考えられ、22 年間の量としても 20,000 m³ 程度であろう。

松原海岸の長期的な変化を、汀線と海底地形について検討した結果、1970 年代後半までに有為な変化が生じており、海岸中央部の広い範囲で汀線が前進し -5 m, -10 m の等深線が後退した (つまり浅海部の海底勾配が急になった) ことと、笹の川河口前面周辺の砂の堆積が生じたことが明らかになった。このうち後者は、海岸中央部から笹の川方向への砂の移動を示唆している。さらに、松原海岸の浅海域の中央粒径が笹の川方向に徐々に小さくなる (図-4) こともこの砂の移動に対応している。1960 年以降、1980 年までに建設された構造物は、金ヶ崎防波

堤 (1970 年 ~ 1972 年) とフェリー埠頭 (1970 年 ~ 1975 年) だけであることを考慮に入れると、沿岸方向への砂の移動は、金ヶ崎防波堤築造による波の遮蔽効果によるものであるといえる。

なお、1970 年代後半から最近までの長期的変化は安定している。しかし、1983 年から新港建設が始まっているので、今後の松原海岸を十分に保全するためにも、最近の変化については章を改めて、さらに詳しく解析することとする。

4. 1982 年以降の海岸地形変化

(1) 測量データの取り扱いについて

新港の建設に着手する前年の 1982 年から毎年 2 月または 3 月に、松原海岸の汀線測量及び深淺測量が継続的に行われている。汀線測量は D. L. 0 m より陸側の領域で、深淺測量は水深 -20 m 程度以浅の範囲で、沿岸方向の 100 m 間隔の測線に沿って実施されている。しかし、深淺測量のデジタル化を岸沖方向 50 m 間隔で行っているために、汀線測量と深淺測量の間に、最大 75 m の空白部が生じていた。

この空白部を内挿して推定した水深値には、誤差が含まれる可能性が高いことが分かった。その例を、図-8 に示す。図-8 の実線は、空白部の非常に狭い測線の水深データの全てを用いて、スプライン近似した断面である。破線は○で囲った実測値をはずして (これが空白部の広い状態に相当する)、スプライン近似した断面である。水深データが 1 点あるかないかによって、沖方向距離 75 m ~ 175 m の範囲の水深が異なる結果になることが分かる。先にも述べたように、当海岸の海底勾配は水深 -10 m 以深で 1/100 程度であり、汀線より陸側の領域では 1/10 程度になっている。このような勾配が変化するところの水深値がないと、スプライン近似による水深の推定は大きな誤差を伴う。今回のケースでは、空白部は勾配の変化する所にほぼ一致していたのである。

そこで、ここでは汀線付近より陸側の測量間隔が密にされている汀線測量データのみに着目し、海岸の変化に限定して以下の解析を行うことにした。

(2) 土量変化解析

図-9 は、1982 年を基準にして 1994 年までの海岸の土量変化を、領域別に算出したものである。海岸の土量変

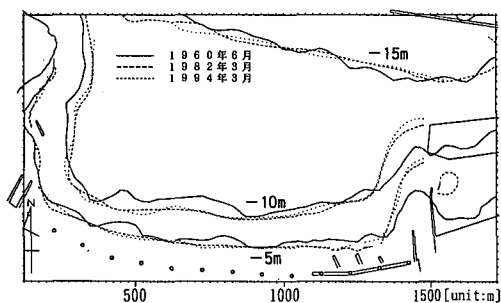


図-7 深淺測量結果による等深線の比較

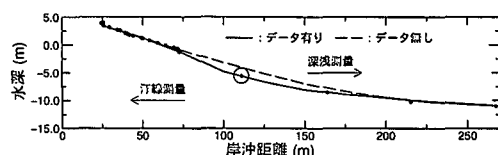


図-8 推定した水深値と実測値

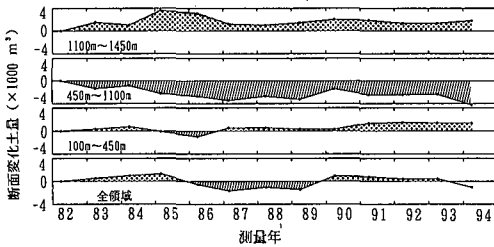


図-9 海岸の地域別土量変化

化を領域別にみると、笙の川に近い 1100 m～1450 m の領域の土量変化は 1982 年から 1987 年の間で生じており、その間の堆積土量はその後変化していないことが分かる。海岸中央部にあたる 450 m～1100 m の領域では、土量が 1987 年まで減少する傾向を示し、その後増減するものの横這いである。また、井の口川に近い 100 m～450 m の領域の土量は、全期間を通して変化が少なく、1991 年に増加した分 1982 年に比べて土量が増加している。この変化は、航空写真から読みとった汀線位置の解析（図-6 参照）だけからは、捉えられなかったものである。なお、海岸全体としてみると、1982 年の土量から 1994 年までの土量は多少の増減は見られるもののほとんど変化していないといえる。

海岸全体の土量収支はほとんどないにもかかわらず、領域別の土量は、海岸中央部で減少し、海岸の両端の領域で増加していることから、海岸中央部より両サイドに向かう沿岸漂砂があったものと考えられる。そのうち、笙の川方向への移動は 1987 年までに、井の口川方向への移動は 1990 年～1991 年の間に生じた。

(3) 経験的固有関数解析

1982 年から 1994 年までの D.L.0 m より陸側の領域のデータを基に、地形変化は、鉛直下向きを正として、経験的固有関数解析（加藤・吉松：1984）を行った。

図-10 は、モード 1（寄与率：45.6 %）の経験的固有関数とその時間係数である。固有関数の図の横軸（沿岸方向距離）は、図-3 のそれに対応しているが、縦軸はそれぞれの測線の基準点からの距離である。縦軸のスケールが横軸と異なるためと、基準点が一直線上にないために歪んだ図になっていることに留意されたい。なお、図中の点線は、1994 年 3 月の等高線である。

時間係数の変化を大きく捉えると、1986 年までほぼ一定の正值であった時間係数は、1987 年にかけて負値へと減少する。その後、1990 年に少し増加するもののすぐに減少し現在に到る。1986 年から 1987 年の時間係数の変化と経験的固有関数の値を掛け合わせて考えると、図中 A, B, C, D のところで侵食、a と b のところで堆積が生じたことになる。

図-11 は、モード 2（寄与率 15.6 %）の経験的固有関

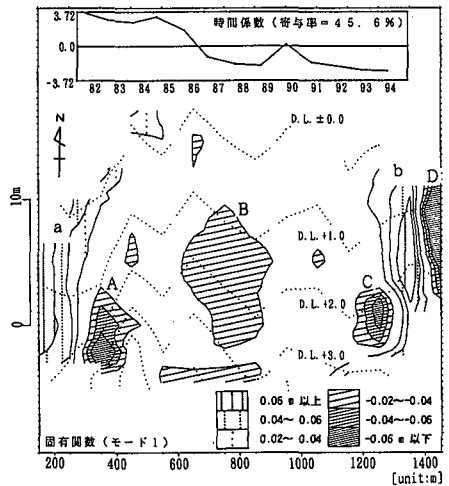


図-10 汀線の経験的固有関数（モード 1）

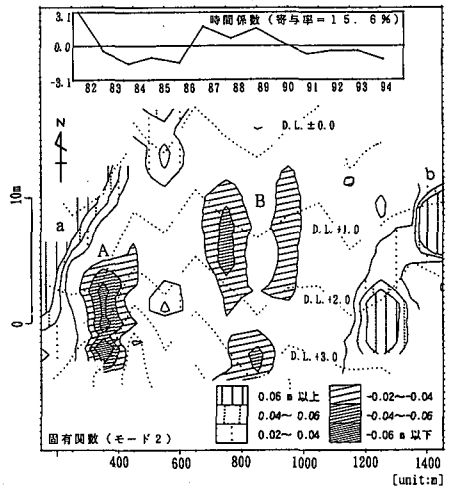


図-11 汀線の経験的固有関数（モード 2）

数とその時間係数を図-10 と同様に示したものである。時間係数の変化に一定の増減はなく、7～8 年周期で変動しているようである。このため、侵食・堆積の領域もこの周期で入れ替わることになる。例えば、1986 年から 1987 年にかけて時間係数が増加するときは、固有関数の A と B のところで堆積、a と b で侵食となる。

何らかの構造物を設置したことに伴う周辺の地形変化は、一般に、非可逆的であるから、モード 1 の 1986 年から 1987 年の変化にその恐れがある。そこで、この変化に注目してみる。ただし、注意しなければならないことは、同期間のモード 2 の堆積・侵食の領域がモード 1 のそれらと一部で重なっているために、変化が相殺しあうということである。したがって、モード 1 の固有関数で検討するのではなく、1986 年と 1987 年の地形の差分を元の

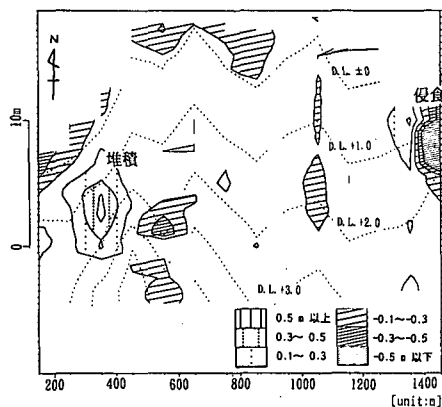


図-12 海岸地形の変化 (1986年3月~1987年2月)

データで直接計算した。その結果が、図-12である。これを見て分かるように目立った侵食が生じているのは、沿岸距離1400 mのD.L.+1 m~+2 mのところである。

(4) 海岸変化の要因

図-9で述べたように、海岸中央部より笹の川方向への砂移動は、1987年までに生じている。また、経験的固有関数解析で、1986年から1987年にかけて笹の川に隣接する海岸で目立った侵食が生じていたことが分かった。ここでは、このような変化が何に起因するかを検討する。

まず、図-5によると、新港の建設は1983に始まっており、1987年までに防波堤はほぼ500 m区間が出来上がっていて、護岸は完成していた。この防波堤の背後にできる遮蔽域は、金ヶ崎防波堤を含み込む程には大きくないと考えられる。つまり、新港の防波堤の影響が金ヶ崎防波堤を越えて松原海岸に及ぶことはないだろう。また、新港建設以前の護岸位置における入射波の波向は護岸に平行になっていたため、護岸による反射波も考えにくい。しかしながら、確認の意味で新港建設以前と新港の1987年の状態、1994年の状態について、波の変形計算を行ってみた。その結果、松原海岸前面での波高・波向の変化は1%以下であった。さらに、防波堤はその後延伸されているにも関わらず、海岸中央部より笹の川方向への砂移動は少なくなっている(図-9)。したがって、汀線より高いレベルの笹の川方向への砂移動は、新港建設の影響というよりは、波浪の大きいときに限って金ヶ崎防波堤の影響が現れたのではないと思われる。ただし、その影響も1987以降はなくなっていることになる。

1986年から1987年の目立った侵食に対応する近隣構造物の建設は見あたらない。そこで、笹の川の河口維持

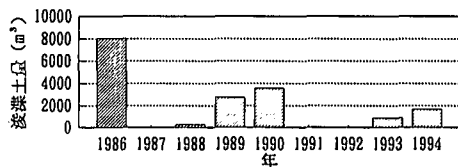


図-13 笹の川河口の浚渫土砂量

浚渫量の経年変化を調べ、図-13に示した。1985年以前のデータ(福井県)は残っていない。図-13によると、1986年に河口内で約8000 m³の浚渫が行われた後は、少ない量の維持浚渫(年平均1,150 m³)が行われている。浚渫は河口内であり、経験的固有関数解析で明らかになった侵食は笹の川に隣接する海岸であるという地域の差があるものの、両者は時間的に対応している。なお、河口維持浚渫の量から、笹の川の流下土砂量は1000 m³/yearのオーダーと判断される。

5. おわりに

本報告をまとめると以下の通りである。

- 1960年以降現在までの松原海岸の長期的変化をみると、1970年代後半までの時期に笹の川左岸の導流堤基部で前進し、西側の井の口川河口付近でやや後退した。しかし、その後大きな形状変化は生じていない。
- 1982年以降1994年までの松原海岸のD.L.0 mより岸側の海岸変化をみると、海岸全体の土量は殆ど変化がないが、中央部で土量が減少し、両側の河口部付近で増加する傾向にあった。このうち、笹の川方向への砂移動は1987年までに生じた。砂移動の要因については、限られたデータからの考察を本文中に行っている。

今後、敦賀新港の岸壁前面の静穏度を確保するため、新港の防波堤をさらに延伸する必要がある。また、笹の川流域の治水管理のためにも、河口部の浚渫を続ける必要がある。これら工事の実施にあたっては、松原海岸への影響に細心の注意を払っていく必要があるとともに、今後も海岸調査を継続していく必要がある。

最後に、本論文のとりまとめにあたり、ご指導いただいた運輸省港湾技術研究所加藤一正課砂研究室長に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 運輸省第一港湾建設局敦賀港工事事務所(1995): 敦賀港 海岸変形調査報告書, 111 p.
- 加藤一正・吉松 晃(1984): 三次元の経験的固有関数による深淺図解法, 港研報告, 第23巻, 第2号, pp. 27-47.
- 福井県敦賀港湾事務所(1977): 松原海岸浸食状況報告書, 177 p.