

沿岸漂砂の卓越する海岸における暗渠型放水路吐口の設計上の留意点

Some Notes on Design Method of Sluce Flood Way on Coast Dominating Longshore Sand Transport

宇多高明*

Takaaki Uda

Relation between the function of sluce flood way and beach erosion on its downcoast was investigated through the field observation at Showa sluce flood way located on the Fuji coast facing Suruga Bay. Beach survey data were analyzed to investigate temporal and spatial change in shoreline position around the flood way. Shoreline change was compared with the theoretical results. This flood way was partly destroyed by wave action associated with the beach erosion and scouring. Successive beach erosion around this structure was made clear by comparison of aerial pictures.

Keywords : sluce flood way, beach erosion, shoreline change, aerial photograph.

1. まえがき

海岸線に沿って細長く砂丘が発達するような海岸では、砂丘背後の低地の排水を行うために、砂丘を横切る放水路が古くから建設されてきた。この種の放水路には開水路型と暗渠型とがあり、流量規模が小さい場合しばしば暗渠型が利用されるが、暗渠型放水路の吐口の位置は、一般には汀線付近とされるのが常である。なぜなら暗渠の敷高は排水効率を高めるためできる限り下げねばならず、一方、暗渠を長く伸ばすことはそれ自体の耐波設計や沿岸漂砂の阻止による周辺海岸への影響などの面から問題が生じるとともに、建設コストの上昇を招くからである。現地海岸ではこれらの点が考慮された上で暗渠型放水路は設計されるのであるが、多くの現地海岸では最近の海岸侵食の激化に伴い、放水路設計当時の前提条件として与えられた汀線が大きく後退して、放水路が被災する事例もかなり多い。すなわち、当初ほぼ安定していた汀線が後退することにより放水路の汀線からの相対的な突出長が変わり、それに伴ってその機能や安定性などに問題が生じるのである。海岸侵食が進んできている現在、放水路の機能や安定性、あるいは周辺海岸への影響については十分認識しておくべきである。このような点より、本研究では、沿岸漂砂の卓越する富士海岸にある昭和放水路および昭和第2放水路とその周辺海岸を取り上げて実態論的考察を加え、暗渠型放水路の設計上の留意点を要約する。

2. 昭和放水路下手側の海岸侵食

富士海岸は駿河湾の湾奥部に位置し、富士川河口西側の蒲原町から狩野川河口に至る延長約25kmの砂礫海岸である(図-1参照)。図-1に示すように、富士川河口の東4.8kmには田子ノ浦港が、その東3.5kmには昭和放水路が、更にその東4.3kmには昭和第2放水路が位置している。また、測線番号の基点は沼津港にあり、ここで取り上げる昭和放水路はNo. 48に、そして昭和第2放水路はNo. 31に位置する。各測線の間隔は250mである。この海岸の全体的海浜変形については、河野ほか(1986)および宇多ほか(1994)に取り上げられており、田子ノ浦港の東側隣接区域での侵食土砂量の経年変化より、沿岸漂砂量や漂砂の移動高などが求められている。本研究では特に昭和放水路と昭和第2放水路周辺の海浜変形について重点的に分析する。

まず、昭和放水路周辺の海岸線状況の変化を写真-1に示す。(a)は1974年12月、(b)は1991年3月の海岸線状況である。1974年当時、ここから西3.5kmに建設されつつあった田子ノ浦港の防波堤による沿岸漂砂阻止の影響はこの付近にはまだ現れておらず、海岸堤防の前面に約140m幅の様な砂礫浜が広がっていた。放水路の出口は当時の汀線にあり、沿岸漂砂は下手側へ連続的に流出しうる条件にあった。その後上手側からの漂砂供給量の著しい減少とともに侵食域が東側へと広がったために、侵食対策として昭和放水路より西側では(b)に示

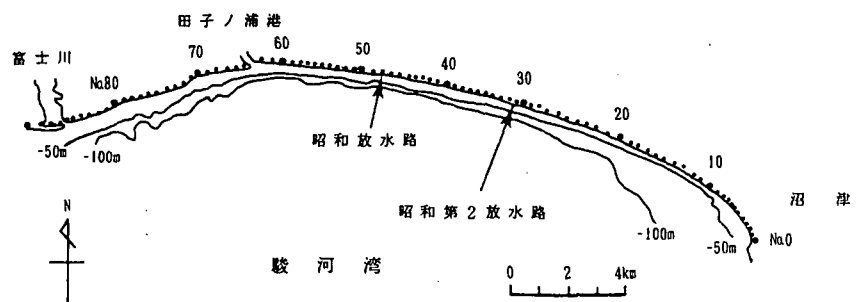


図-1 富士海岸の測線配置と昭和・昭和第2放水路の位置

*正会員 工博 建設省土木研究所河川部長 (〒305 茨城県つくば市旭1)

すように汀線に沿って堤長100mの消波堤が設置され、汀線の後退が防がれた。昭和放水路の先端は1974年当時汀線上にあり、放水路の東西で汀線の不連続は見られなかったが、海岸侵食とともに放水路は突出することになった。このため放水路はそれより西側区域の土砂流出を防止する一方、東側では汀線が大きく後退し、階段状の汀線となった。以上のように、当地域では海岸侵食が時間的には緩やかではあるが、確実に東側へと広がってきた。

図-2には、代表4時期の1975年を基準とした汀線変化量の沿岸分布を示す。ここに、測線配置は図-1に示したとおりである。まず、1978年12月では約10mの変動は見られるが、放水路自体の影響と見られる汀線変化は生じていない。その後、1984年、1990年、1994年と時間経過とともに汀線の後退量が増大した。汀線の後退量は放水路の隣りのNo. 48で最も大きく、放水路より東側に離れるほど小さくなる。同時に、明瞭な汀線後退の見られる位置、例えば10mの後退を示す位置を選ぶと、この位置は時間経過とともにNo. 44～No. 42の間で東側へと広がっている。

図-3には、代表4測線の汀線の経年変化を示す。互いに500mずつ離れている各測線の汀線は、1990年頃までは比較的単調に後退し、特にNo. 48で典型的なように汀線の後退はほぼ安定状態に近づきつつあった。しかし、1991年～1992年にはNo. 48で大きく汀線が後退し、急激な汀線の後退が次第に東側へと広がっていったことがわかる。

以上に述べた汀線変化に対応する海浜縦断形の変化の一例を図-4に示す。測線No. 48の縦断形の1975年～1993年における変化である。1975年当時、汀線付近が上に凸な縦断形を有していたが、汀線の後退とともに-13m～5mの間が侵食され、上方に凹な形状へと変わった。1975年当時の汀線は、1993年では-9mと非常に深くなった。このため昭和放水路は耐波安定性が損なわれる結果となった。なお、-13m以深で断面形にかなりのずれが認められるが、これは沖合の海底地形が勾配約1/2と急峻なため、測線誤差が現れたものと考えられる。

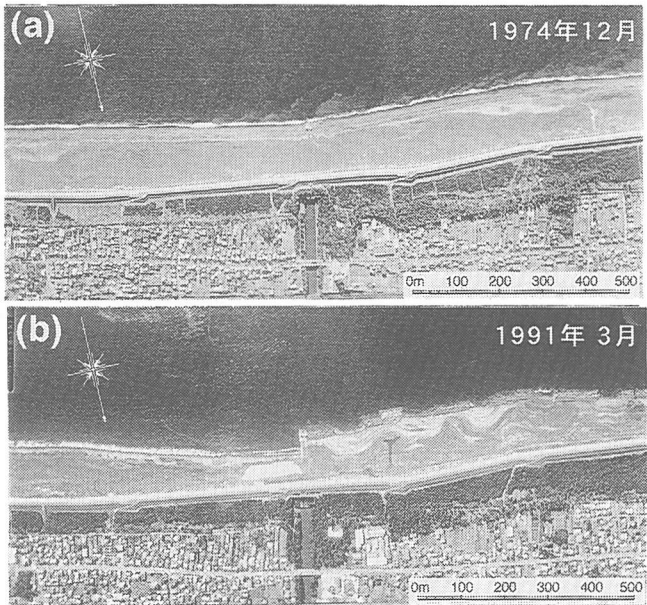


写真-1 昭和放水路周辺の海岸線状況
(1974年12月、1991年3月)

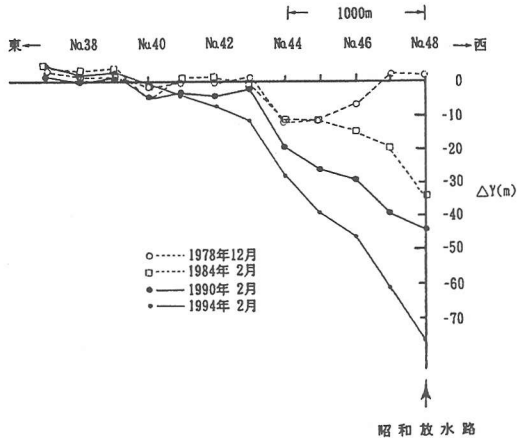


図-2 昭和放水路東側区域の汀線の場所的变化

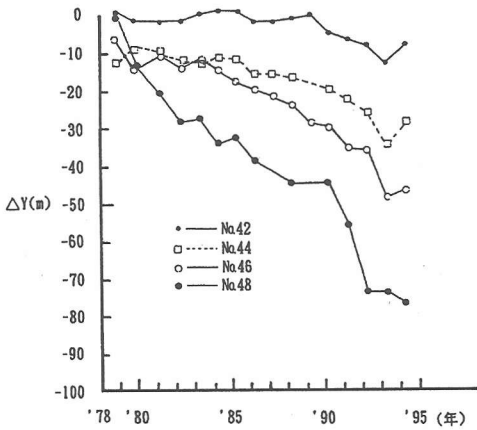


図-3 昭和放水路東側区域の汀線の経年的変化

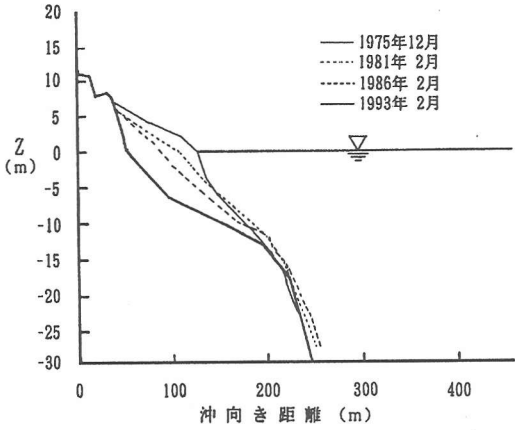


図-4 昭和放水路に隣接する測線No. 48における海浜縦断形の変化

3. 現地写真による昭和放水路周辺の海岸状況の変遷比較

1970年以降の海岸状況の変遷を調べてみる。写真-2には1970年の放水路の状況を示す。放水路の先端は汀線付近にあり、台形状の空気抜き部分は十分岸側に位置していた。この状況は写真-1(a)の1974年に対応するものであり、上手（西）側からの沿岸漂砂が自由に東側へ回り込んでいた時期の放水路付近の状況をよく表している。写真-3は写真-2より20年後の1990年8月10日に撮影された高波浪時の放水路の状況である。空気抜き付近に高い碎波が作用し、放水路の東側の汀線が大きく後退した状況が見てとれる。同様に写真-4には1991年の海岸状況を示す。空気抜きの東側は完全に海となり、コンクリート製樋管を補強するために一部矢板が見られる。こうして約20年間を経て、主として陸上部にあった昭和放水路は海中に突出する構造物に変わっていった。もともとの放水路は陸上構造物として設計されていたのが、その先端水深が9mとなるに及んで波力に対する構造的安定性が失われるに至った。また、放水路の東側隣接部では楔状に汀線が後退して海岸堤防の安全度が危惧される状況となった。このため1992年3月には写真-5に示すように海岸堤防の基礎が固められるとともに、その前面で礫が投入された。また同年10月には写真-6に示すように放水路の改築工事が開始され、海岸堤防の根固工の区間も大きく伸びた。1994年3月には放水路の工事もかなり進み、その前面には大量の消波工が設置された。このような施設は従来わずかずつではあるが放水路の先端を越えて東向きに流出していた漂砂の阻止率を向上させることになった。

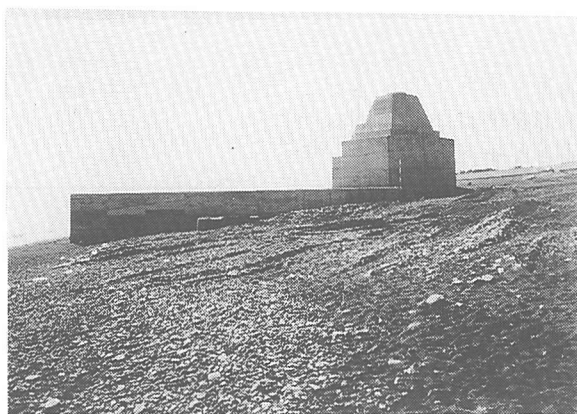


写真-2 昭和放水路（1970年）



写真-3 昭和放水路（1990年8月10日）

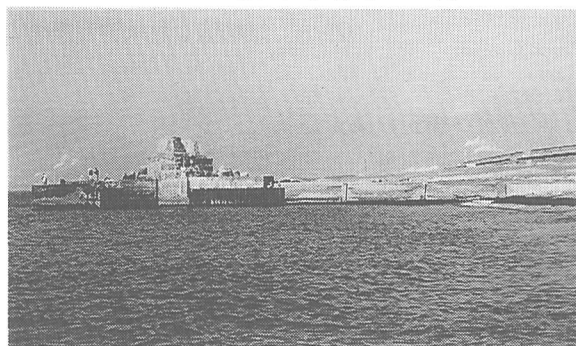


写真-4 昭和放水路（1991年）



写真-5 昭和放水路の斜め写真（1992年3月）



写真-6 昭和放水路の斜め写真（1992年10月）



写真-7 昭和放水路の斜め写真（1994年3月）

4. 昭和第2放水路周辺の海浜特性

昭和第2放水路周辺での長期的な汀線変化状況を昭和放水路の場合と同様にして調べてみる。写真-8には1974年12月と1992年3月の空中写真を示す。約17年間の変化である。1974年12月段階において既に放水路の西側と東側で汀線が不連続となっており、西側の汀線は放水路の先端まで突出し、逆に東側ではフック状になっている。バーム頂を連ねる線も汀線と平行に延びている。この段階では汀線が放水路の先端にまで達していたことから判断して、東向きの沿岸漂砂は放水路の先端を回り込んで東側へと流出していたと推定される。一方、1992年3月の汀線状況は1974年12月と比較して著しい変化は見られず、ほぼ同様な特徴を示す。以上より、少なくとも空中写真で見える限りにおいては、昭和第2放水路周辺の汀線は約20年間ほぼ安定状態にあったことが分かる。

昭和放水路の左右岸における海浜縦断面形を図-5に示す。No. 31は放水路の西側面に、No. 30は東側250mに位置する測線である。2つの断面を比較すると、この海岸で漂砂による地形変化が活発な-13m以深において沿岸方向に250m離れた両測線で大きなずれが見られる。これは河野ほか（1986）でも示されているように、この付近の沖合の海底地形が沿岸方向にかなり大きな変動を示すためである。このことから、-13m以浅のみの断面形の違いを調べると、放水路の西側では東側と比較して21m汀線が突出するとともに、汀線付近の勾配が急になっている。そして約2mの高さのバームがよく発達していることが見てとれる。こうした断面特性は、図-4に示した昭和放水路に隣接するNo. 48での1975年の断面特性とよい対応を示している。結局、昭和第2放水路を境に汀線が不連続となり、漂砂の上手（西）側では砂礫が堆積して汀線付近の勾配が急になっていることが明らかである。

以下では1994年5月13日の現地踏査時の写真により昭和第2放水路周辺の海岸線状況について調べてみる。写真-9, 10はそれぞれ放水路より西方（漂砂上手側）、東方を望む写真であり、放水路法線に直角方向に撮影したもので、しかも写真-9の撮影後同一地点に立ったまま180° 方向を変えて撮影したものである。放水路の西側では放水路先端付近まで砂礫が堆積し、標高約2mのバームが形成されていた。バームの陸側斜面は礫が乾燥しているため白っぽく写されている。写真-9と比較して東側を望む写真-10においては、汀線が不連続となって大きく後退していることがよくわかる。図-5に示した放水路の左右岸の海浜縦断面形によれば、放水路を挟んで左右岸の



写真-9 昭和第2放水路の西側海岸



写真-10 昭和第2放水路の東側海岸

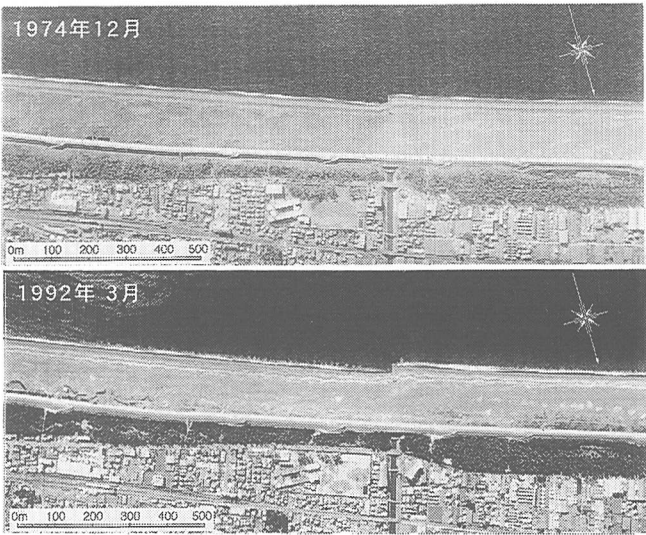


写真-8 昭和第2放水路周辺の海岸線状況
(1974年12月、1992年3月)

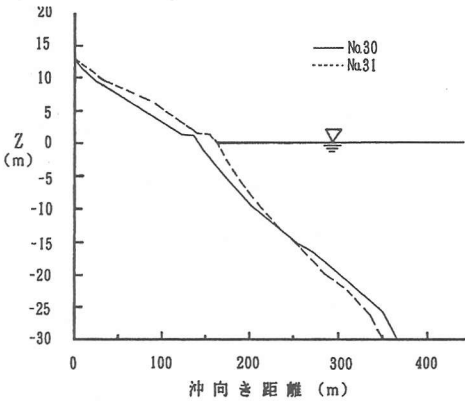


図-5 昭和第2放水路付近の
海浜縦断面形の変化

汀線が21mずれていたが、これがほぼ妥当なことは写真-9, 10の比較からも明らかである。このように不透過放水路を境にして汀線の不連続が生じているが、昭和第2放水路では漂砂は下手側へと流出しており、放水路の下手側で著しい侵食が生ずる条件には至っていない。

5. 汀線変化の理論解へのあてはめ

ここでは突堤状構造物の下手側の海浜変形に関し、理論解へのあてはめを考える。昭和放水路位置に原点を取り東向きにx軸を定め、汀線位置が $y(x,t)$ で与えられるとする。昭和放水路を横切る漂砂量を0としたときの汀線

変化の理論解は野田・橋本 (1981) に示されているように式(1)で与えられる。

$$y(x,t)=\frac{\tan \alpha_n}{\sqrt{\pi}}\left[\sqrt{4 A_n t} \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4 A_n t}\right)-x \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4 A_n t}}\right)\right] \cdots \cdots(1)$$

ここに、 α_n は初期碎波角、 $\operatorname{erfc}(u)$ は誤差関数であり、

$$\operatorname{erfc}(u)=\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} \exp \left(-u^2\right) d u \cdots \cdots(2)$$

であり、また A_n は漂砂量 q を

$$q=F \cdot \sin \alpha_b \cos \alpha_b \cdots \cdots(3)$$

としたとき、 $A_n=F / h$ で与えられる。ここに h は漂砂の移動高、 α_b は碎波角である。いま、 $\zeta=x / \sqrt{4 A_n t}$ とおいたとき、 $\zeta=0(x=0)$ では

$$y(0, t)=\frac{\tan \alpha_n}{\sqrt{\pi}} \sqrt{4 A_n t} \cdots \cdots(4)$$

となることから、

$$\frac{y(x, t)}{y(0, t)}=\exp \left(-\zeta^2\right)-\zeta \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}(\zeta) \equiv F(\zeta) \cdots \cdots(5)$$

が得られる。式(5)の左辺には t が陽形式で含まれているのに対し、右辺は ζ のみの関数となっていることが特徴である。いま、式(4)、(5)の現地データへのあてはめを考える。式(4)は、放水路の東側側面に位置するNo. 48での汀線変化を与える。既に図-3にNo. 48の汀線変化は示されているが、1991年以降は対策工の工事起因すると考えられる汀線の急激な後退が生じていることから、1978年～1990年の汀線変化へのあてはめを考える。式(4)によれば $y(0, t) \propto \sqrt{t}$ の関係が成立するので、1978年を基準として時刻 t を測るとともに、汀線変化が起こる前の1975年時点を基準とした汀線変化量を求めて図示すると図-6となる。 $y(0, t)$ と $\sqrt{t}$ の間には図中に示す関係が成立する。このようにして $y(0, t)$ が定められれば式(5)の左辺は定まる。一方、 $\zeta=x / \sqrt{4 A_n t}$ なので A_n を仮定すれば ζ が定まる。そして式(5)の右辺は ζ のみの関数であるから ζ を変化させれば関数系は一意的に定まる。図-7には $F(\zeta)$ の理論曲線を実線で示した。いま、 $F(\zeta)$ を式(5)の左辺より計算し、横軸の ζ を (x, t) を与えて A_n を種々変えてプロットすると、理論解との対応がよい A_n として $A_n=10^5\left(m^2 / y r\right)$ となる。図-7に示す●印は理論解との対応を示す。 $F(\zeta)$ が小さい所では汀線変化の小さいときは測定精度との関係もあってばらつきが大きいが、汀線変化が大きくなると理論解と実測値とはかなり良好な一致を示す。

図-7では ζ が大きい所でデータが不足している。この点をサンプリング間隔との関係で考察してみる。 ζ は x, t の関数であるが、 x, t は実際には離散的な量であり、測線間隔を Δx 、測定間隔を Δt としたとき、 $x=m \Delta x(m \geq 1), t=n \Delta t(n \geq 1)$ と表されるので、

$$\zeta=\frac{m \Delta x}{\sqrt{4 A_n n \Delta t}} \cdots \cdots(6)$$

となる。富士海岸の場合、 $A_n=10^5 m^2 / y r, \Delta t=1 y r, \Delta x=250 m$ であるから、

$$\zeta=0.40 \cdot m \cdot n^{-1 / 2} \cdots \cdots(7)$$

となる。図-8には m, n, ζ の関係を示す。図-7によればデータの不足す

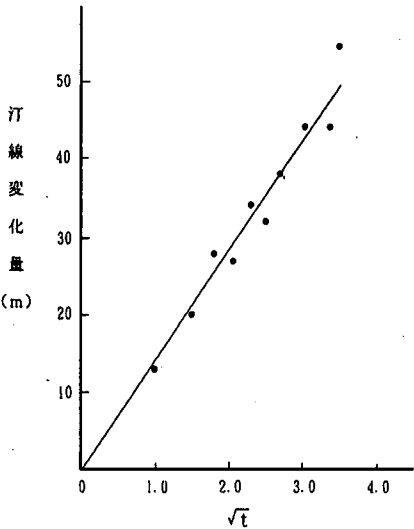


図-6 測線No. 48における汀線変化 $y(0, t)$ と $\sqrt{t}$ の関係

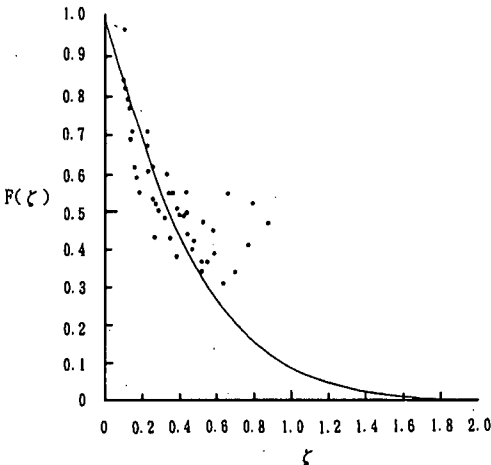


図-7 $F(\zeta)$ と ζ の関係

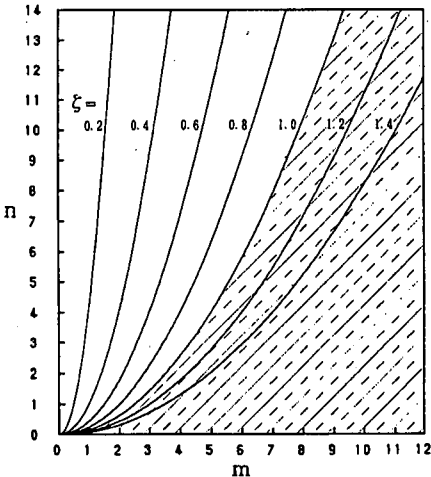


図-8 ζ と m, n の関係

るのは $\zeta \geq 1.0$ の区域であるから、図-8ではそれを満足する範囲をハッチで示した。一方、図-7によると $\zeta \geq 1.0$ での $F(\zeta)$ は0.09以下であり、しかも ζ の増大とともに減少している。図-7で ζ が1.0付近の値をプロットするには、図-8では放水路近傍ではごく初期の値か、あるいは放水路より離れた所で十分時間が経過したときに限られる。しかし富士海岸の場合測量間隔は常に1年なので $0 \leq n \leq 1$ の範囲は除外され、結局、放水路より離れた所でのデータに依存することになる。当然予想されるように、このような場所ではビーチカスプの発達など汀線の短期的変動によるある程度の誤差は必ず伴う。このことから結局 $F(\zeta)$ がばらついてしまい、有効なデータは取れなくなる。以上の点より、図-7で ζ が大きい部分でのデータが不足するが、これは現地データの取得上避けられぬものであり、したがってこれを考慮すれば、理論解は実測値とかなりよく対応すると言える。

昭和放水路周辺での沿岸漂砂量に関し、宇多ほか（1994）は、河野ほか（1986）の求めた漂砂の移動高 $h=13.3m$ を汀線変化面積に生ずることにより計算し、1968年～1991年の平均で $1.0 \times 10^5 m^3/yr$ と求めた。また、宇多ほか（1994）では α_b を空中写真より約 5° と推定した。これらの値を式（3）に代入して F を逆算すると、 $F=1.15 \times 10^6 m^3/yr$ となる。さらに $A_b=F/h$ の関係より A_b を求めると $A_b=8.6 \times 10^4$ となる。この値は実測値のあてはめに用いた 1.0×10^5 と非常に近い値である。このことから、昭和放水路周辺の海浜変形は沿岸漂砂の阻止によるものであることが再確認される。

6. 暗渠型放水路の設計上の留意点

暗渠型放水路として2事例を示した。昭和放水路は上手側からの沿岸漂砂の供給不足により施設の下手側で侵食が進み、暗渠設計時の汀線が水深9mにも達した。このため暗渠は構造的にもたなくなり、暗渠は被災し改修されるに至った。暗渠の下手側の侵食は直接的には暗渠自体が引き起こしているが、より根本的には沿岸漂砂の供給が途絶えたことが指摘される。このことは、暗渠の設計時、一連の海岸の中で、暗渠の占める位置、およびそこでの長期的な漂砂環境の変化を十分予測すべきことを示している。また、暗渠の下手側が侵食されると、そこでの局所的対策として汀線に平行に消波ブロックが投入されることが多いが、侵食の原理上、さらにその下手側が侵食され、結果として延々と消波ブロックが並ぶことになる。これを避けるには、例えば一連海岸全体を眺め、図-9に示すように、他の放水路や漁港・港湾の防波堤なども含めて海岸線全体を安定化させる方法を導入し、必要個所にヘッドランド等を設置することが必要である。すなわち、暗渠自体の設計もさることながら、他の施設との相互関係を考慮し、場合によっては暗渠により沿岸漂砂を積極的に阻止し、それ自体がヘッドランドと同様な機能を発揮させることも必要となる。

一方、昭和第2放水路では、現在沿岸漂砂は下手側へ流出しており、動的な意味で安定状態にある。しかし漂砂供給が不足すれば、やがて昭和放水路と同じ状況になると考えられる。したがって放水路周辺での汀線の長期的変動のモニタリングが必要である。

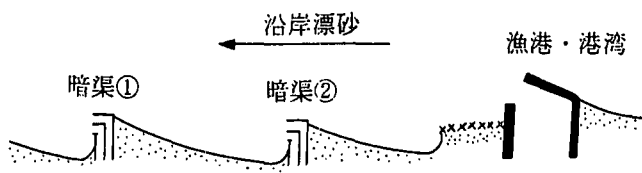


図-9 一連海岸全体の中での各種施設による海岸線の安定化方策

7. あとがき

現在、海岸には所管の異なる各種施設が多数設置されている。一方、沿岸漂砂の供給不足や漂砂の遮断は各所で起きている。そのため従来動的安定状態にあった暗渠の周辺で侵食が進み、それ自体が被災する例も増えている。こうした状況を改善するには、従来よりも広域的に海岸の現象を見、海岸に関係する管理者相互が密接に協議を進めた上で協調的に事業を進めることが必要である。

参考文献

- 宇多高明・山本幸次・張 達平（1994）：富士海岸の海岸侵食とその対策，海岸工学論文集，第41巻，pp.526-530.
- 河野 宏・宇多高明・藪崎義之・水野益宏（1986）：富士海岸の侵食実態と地形変化予測，第33回海岸工学講演会論文集，pp.287-291.
- 野田英明・橋本 宏（1981）：漂砂と海岸保全施設，技報堂，p.157.