

構造物による海浜変形とそれに伴う海岸決壊

——市振海岸を対象として——

土屋義人*・河田恵昭**・山下隆男***・西 良****

1. 緒 言

沿岸漂砂の連続性が海岸構造物の築造によって崩れると、下手側海岸では、一般に、前浜勾配の急峻化、前浜の消失、波消と称して置かれた消波ブロックでの波の反射による離岸漂砂の助長というような過程で海岸侵食が進行し、かつて前浜であったところに水深が数m以上の深い海域が形成される。

このような侵食過程はすでに10年以上も前から指摘されてきたことである。この間、種々の侵食対策の実施と海岸構造物築造が経年的に並行することが多く、侵食傾向を緩和もしくは侵食速度を遅延できず、現在に至っている例を多く挙げるができる。そして、それらの海岸ではつぎの段階、すなわち海岸侵食から海岸決壊に至る過程に入りつつあり、一部では高波浪時に浪害が顕在化している。

新潟県の市振海岸はその典型例である。1965年に始まる漁港建設と防波堤の延長に伴い、西向きに沿岸漂砂を阻止するにつれ、漂砂の下手側に当たる漁港西側の海岸では侵食が1970年代より顕著となってきた。海岸侵食対策も効果がなく、現在では市振漁港の西側海岸線のほとんど全域にわたって前浜が消失し、消波ブロックが積み重ねられているといった状況である。この地方特有の寄り廻り波が発生すると、背後の護岸が決壊する事態に至っている。

本研究では、過去の調査結果(1981, 1988)を踏まえて、市振海岸が侵食海岸から決壊海岸に至った過程を、資料解析と数値シミュレーションによって明らかにしようとするものである。

2. 市振海岸の海浜変形と海岸決壊の実態

2.1 市振海岸の概要

市振海岸は、図-1に示すように、富山県との県境である境川をはさんで、宮崎海岸と接続しており、主たる

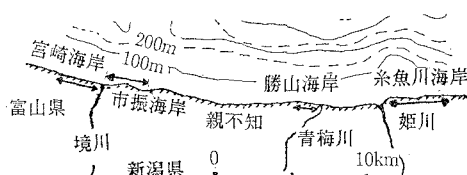


図-1 市振海岸の位置図

漂砂源は姫川からの流送土砂である。しかし、姫川流域の砂防ダムを含む各種ダム群の建設による河口部への流送土砂量の激減とその周辺での海岸構造物による折止によって、東西両方向への沿岸漂砂量は減少しており、これは、河口部東海岸の糸魚川海岸においても、姫川港の東防波堤の延伸の影響と相まって、深刻な海岸侵食をもたらしていることは周知の事実である。

2.2 波浪特性

波浪については、日本道路公団が親不知に設置した超音波波高計(観測水深: T. L. -10m)による1983年1月から1990年12月の約6年間の記録(1986年と87年は欠測)を用いて、その特性を検討した。

すでに、宇多ら(1988)はこの期間の波浪記録と同時期の建設省の田中観測点(市振海岸の西12kmに位置する下新川海岸地先にあり、観測水深は、T. P. -15mである)のそれとの比較から、有義波高の分布形状は両地点でよく似ているが、観測水深の影響もあってか、親不知の方が若干小さく、また、有義波周期についても同様の傾向が見いだされると指摘している。そこで、有義波高2m以上の出現頻度を調べると表-1のようである。これによれば各年で変化するが、高波浪の平均延べ継続時間は245hrであることがわかる。さらに図-2はエネルギーフラックスを示したものであり、隣接海岸の場合と同じく、11月から翌年の3月にかけて大きくなることが確認される。なお、高波浪の波向き特性については、つぎのように考えられる。隣接する宮崎海岸では有義波周期が7-10sで波向きがNNEからNEが卓越しており、ついで有義波周期7-8s、波向きがNW-NNWのものが多くなっている。前者は、とくに寄り廻

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

*** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

**** 正会員 工修 (株)神戸製鋼所

り波に対応したものであり、後者は季節風時の発達中の風波の特性を表している。

2.3 底質特性

市振海岸のように砂礫海岸では、底質特性の沿岸方向変化が沿岸漂砂の移動方向について正確な情報を与えてくれると考えられる。最大粒径の分布では調査した1979年6月と1980年2月のいずれも、市振漁港から西に向かって最大粒径が漸減しているが、境川に近づくともむしろ大きくなっていることが見だされた。これは、境川の出水に伴う短期的・季節的な変動や前述した波のそ上・反射が影響したと判断された。一方、1980年10月には図-3に示す4点で約 1 m^3 の砂礫を採取し、粒度分布と鉱物組成が調べられた。この場合、解析に用いられた仮定は、つぎの通りである。1) 移動の1方向性、2) 堆砂砂礫と流送砂礫の同一性、及び3) 砂礫の非損失、非摩耗性である。なお、解析では case-1 として、細かい底質は市振漁港の先端から西側に回り込んでいると考えた場合、case-2 ではB点の粒度分布には台風7916号の影響が介入しており、粒径の細かい部分の粒度分布の特性はこの地点でのそれを代表するものではないと考えた場合であって、その限界の粒径を 31.1 mm と置いている。粒度と鉱物組成を併用した解析から、市振漁港の防波堤の築造によって、築造前の市振東海岸（漁港の東海岸を便宜的にこう呼ぶことにする）における推定沿岸漂砂量の3から7倍程度の沿岸漂砂が市振西海岸で発生することがわかった。

2.4 海浜変形の特性

(1) 漁港整備の影響

図-4は経年的な漁港整備を図示したものである。防波堤は、底質の調査が行われた1980年当時からさらに140 m 延伸しており、現在、先端水深が約 10 m に達している。なお、漁港拡張に伴って1965年から67年にかけて設置されたケーソンが撤去されている。図-5は1947年と市振西海岸の前浜がほぼ消失した1987年とを比較したものである。この間の40年間で最大約 110 m 汀線が後退したことがわかる。近年では市振東海岸に2基の離岸堤が設置され、舌状砂州が背後にでき、沿岸漂砂の西方向への移動をかなり阻止している。

(2) 沿岸方向変化特性

図-6は市振海岸における侵食・堆積図の1例であり、陰影の部分が侵食を示し、等侵食・堆積領域は1 m ごとにコンタを入れてある。なお、計算領域は深浅測量図の全域であって、沖方向におよそ 800 m であり、線形内挿によって 15 m 間隔の水深を求めて作図している。これから気がつくことは、対象海域全体での侵食あるいは堆積量がいずれも 10 万 m^3 のオーダーであって、活発な底質移動がうかがわれる。しかも、沿岸方向に縞状に

表-1 親不知における有義波高 2 m 以上の高波浪の来襲時間

Year	Hours	$H_{1/3}\text{ (m)}$	$T_{1/3}\text{ (s)}$
1983	272	2.41	8.32
1984	324	2.37	8.34
1985	270	2.51	8.54
1988	270	2.63	8.80
1989	152	2.38	9.15
1990	182	2.74	9.55

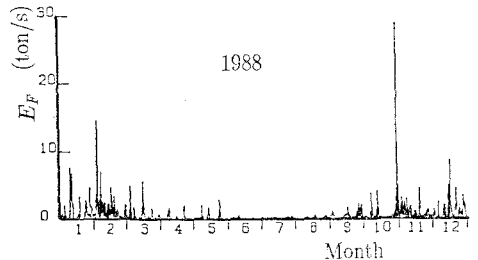


図-2 親不知における波のエネルギーフラックスの時系列

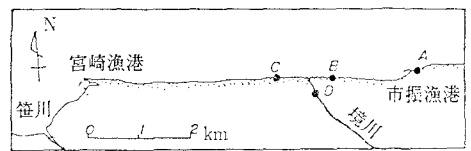


図-3 底質採取点

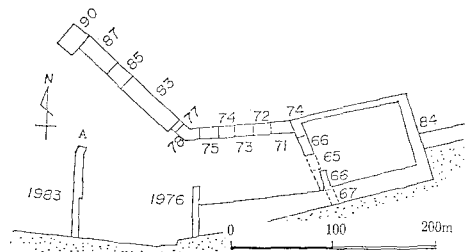


図-4 市振漁港の経年的な整備

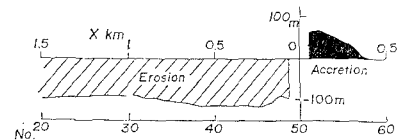


図-5 1947年から1987年の40年間の汀線変化

侵食・堆積域が分布していることが認められる。とくに、市振漁港東側では、岸沖方向の急峻な傾斜に沿って水深 15 m 付近の海底まで漂砂の移動が認められる。これから、この海域では経年的に単調な侵食傾向ではなく、年によっては堆積量が侵食量に匹敵するほどの値に

なりながら、汀線近傍から沖に向かって侵食されていることが見いだされる。

(3) 岸沖方向変化特性

図-7 は1978年9月と1989年3月の汀線と水深-10mの等深線の位置を示したものである。これから、市振漁港の東では漁港に近づくにつれて-10mの等深線の位置が沖方向に移動するのに対し、西側では逆に岸方向に近づいていることが見いだされる。図-8 は、1977年と91年の各測点ごとの海浜断面の経年変化を表したものである。これから、つぎのことが指摘できる。すなわち、境川河口付近から No. 27 (位置は図-5を参照) 付近までは経年的には大きな変化はない。しかし、No. 28より以東で市振漁港までの区間では、とくに水深10m以浅において海浜勾配が急峻化しており、ところによっては1/7程度にまでなっている。また、市振漁港の東側でも測点 No. 60に見られるように、全体に深くなりつつあることも見いだされる。これは、西向きの沿岸漂砂量が減っていることに起因している。

2.5 最近の海岸決壊の特性

JR 西日本の資料によれば、市振駅構内における海岸災害の歴史は、1970年から始まったようであり、現在までに23回を数える。ただし、これには越波による列車運行の見合わせが含まれていないので、これを含めればこの数倍になると言われている。ここでは、もっとも最近の被災事例を紹介する。

1989年11月2日未明、市振駅構内の105m区間で護岸が寄り廻り波のために決壊した。この時の波浪条件として、低気圧通過後の午前2時に親不知で最大波高4.51m、周期11.5sを記録している。この波は親不知で1982年に観測が開始されて以来の、継続時間20時間以上で寄り廻り波が発生したストームの中で上位16位に相当するものであって、毎年一度は発生してもおかしくない波浪であった。ちなみに、期間中の最大有義波高(最大波は観測されていない)は1988年10月29日に観測されており、5.56m、その周期は9.5sであったが、市振では越波のために21本の列車が運休している。

3. 海底地形の変化に伴う波浪の集中特性の変化

対象としている海域では、海底地形による波浪の屈折、回折変形に影響する水深数10m付近まで、中部日本海沿岸の特徴である海谷の入り組んだ複雑な地形をしているうえ、沿岸部には小さな岩礁、浅瀬が点在しているため、波浪変形の数値計算には土屋ら(1992)によって開発された緩勾配方程式の放物近似方程式を用いた。

代表的な海底地形として、つぎのものを選定した。すなわち、(a) 1977年3月：海岸侵食がまだそれほど進行していない、(b) 1983年3月：海岸侵食が進行中であ

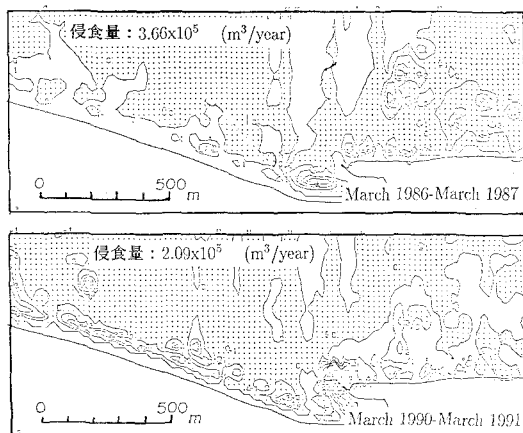


図-6 侵食・堆積図の1例

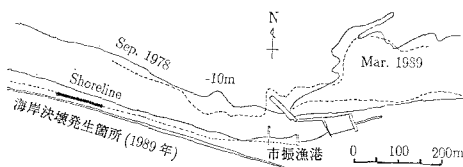


図-7 -10m等深線と汀線の位置の変化

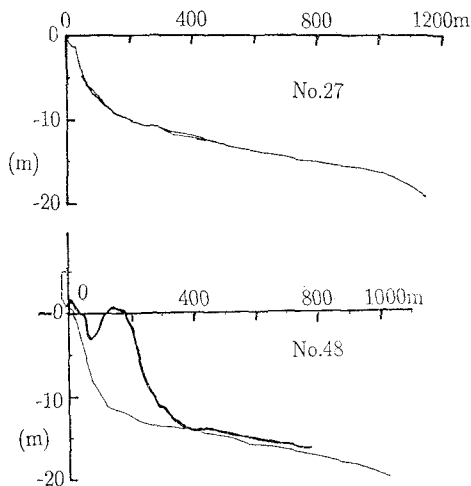


図-8 海浜断面の変化(細実線: 1977年, 太実線: 1991年)

る、および(c) 1991年3月：海岸決壊が発生する危険性がある、の3段階の海底地形を選んだ。また、波向は後述する代表波のN方向とし、それぞれ22.5°東西に振った角度からの入射を考え、合計3つの波向に対する計算を行った。計算結果を出力した図面が多いので、ここでは、海底地形の変化がどのような形で現れているかに主眼を置いて考察する。

まず、図-9 は前述した3つの海底地形に対して、沖

波高を 2.5 m としてそれぞれ、(波向, 周期) が case 1 (N 22.5° W, 8 s), case 2 (N, 10 s) および case 3 (N 22.5° E, 12 s) として計算した波向線の 1 例である。これから波向が N 22.5° W の場合を除いて、沿岸方向に波の集中する場所がかなり等間隔に位置することが見いだされた。これは図-6 ですでに指摘した、侵食・堆積域が沿岸方向に交互に見られる現象と対応しているようである。つぎに、図-10 は case 3 の場合の波のエネルギーフラックスの経年変化を調べたものである。これから、エネルギーフラックスの沿岸分布は近年になるにつれて凹凸の絶対値が大きくなり、かつ沿岸方向の変動域が広がる傾向を示すことがわかる。しかも、海岸決壊が発生しているところでは、波浪のエネルギーフラックスの符号が逆転し、侵食が激化する位置とかなりよく一致していることがわかる。case 1 及び case 2 の計算結果でも同様の特性をもっていることがわかる。しかも、この傾向は波向が東寄りになり、かつ周期が長くなるにつれてより明確になってくるようである。したがって、これらの結果は近年の寄り廻り波による海岸決壊の発生とよく対応していると言える。

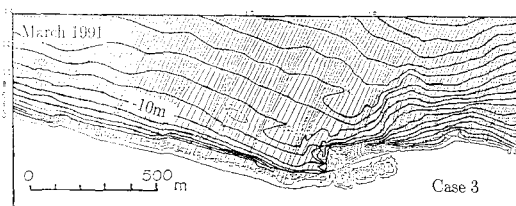


図-9 波向線 (波向: N 22.5° E, 周期: 12s)

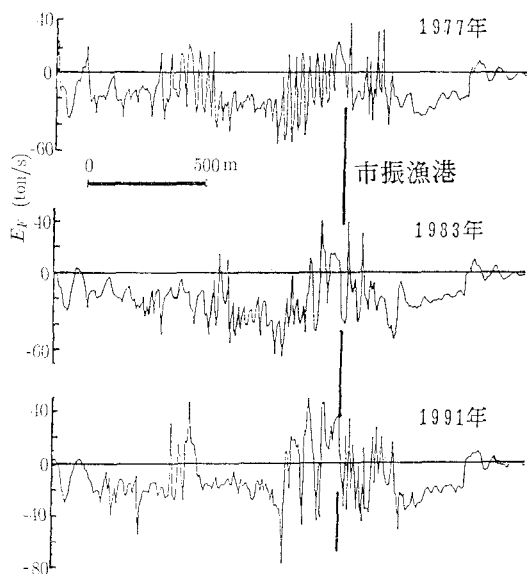


図-10 海岸侵食の進行に伴う波のエネルギーフラックスの変化

4. 汀線変化の追算と海岸決壊に関する考察

4.1 汀線変化予測モデル

長期的な海浜変形は、汀線変化量を計算する実用的モデルである 1 ラインモデルにより検討することができ。ここでは、漂砂量式として CERC 公式を適用し、汀線変化の勾配が小さいと仮定すると、漂砂量 Q に関する線形拡散方程式が、次のように与えられる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{dQ/d\alpha_{BS}}{h_k(1-\lambda)\{1+(\partial y/\partial x)^2\}} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\frac{dQ}{d\alpha_{BS}} = \frac{\rho g^3}{32\pi} H_0^2 K_R^2 T \cos 2\alpha_{BS},$$

$$A = \frac{\rho g^3}{64\pi} H_0^3 K_R^2 T$$

なお、変数の定義は慣用に従う。式 (1) を Crank-Nicolson 法により差分化し、適当な境界条件の下で、 Q^{n+1} を求め、次式から汀線変化 y^{n+1} を計算する。

$$y^{n+1} = y^n - \frac{\Delta t}{2h_k(1-\lambda)} \left(\frac{\partial Q^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial Q^n}{\partial x} \right) \dots (2)$$

4.2 汀線変化の追算

市振海岸の10年のオーダーの汀線変化特性を検討するに当って、波向きを含めた来襲波浪のベクトル特性がモデル化されていないため、海浜変形 (汀線変化) の代表波浪を決めて汀線変化を計算する。

(a) 代表波浪の決定

まず、海浜変形に寄与する波浪として、有義波高 2 m 以上のものを対象とし、その他のものは除外する。すなわち、5年間 (1985-1989) の波浪観測データにおいて、有義波高が 2 m 以上のデータから、その年間作用時間、次式で定義するエネルギー平均波高 $\bar{H}$, 平均周期 $\bar{T}$ を計算する。

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N H_i^2 T_i}{\sum_{i=1}^N T_i}}, \quad \bar{T} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N H_i^2 T_i}{\sum_{i=1}^N H_i^2}$$

得られたエネルギー平均波高は、 $H=2.5$ m, 周期 $T=8.5$ s である。また、波浪の作用時間は 245 hr/yr である。代表的な波向きは、つぎのようにして求めた。すなわち、今回のように複数枚の深浅測量図がある場合、汀線変化と土砂量との関係を調べ底質の移動限界水深を決定する。これにより、1 ラインモデルの適用性の度合が判断されるとともに、沿岸漂砂量が計算される。さらに、沖波の波向きを変えて、波浪の変形計算をし、碎波点での波浪エネルギーの沿岸方向分布から、沿岸漂砂量が推定でき、両者を比較すれば代表的な波向きが推定できる。ここでは、1977年から1989年までの11枚の深浅測量図があるので、沖波の波高を 2.5 m に固定して、周

期 8, 10, 12s について、波向きを N, NNW, NNE として、前節で示した緩勾配方程式の放物近似方程式による数値モデルで波浪の変形計算を行い、砕波点での波高、波向きの沿岸方向分布を求めた。さらに、これを用いて CERC の公式で沿岸漂砂を計算し作用時間を考慮して、海底地形の変化から求められている沿岸漂砂量と比較すると、代表波向きを決定することができる。図-11 に波向きと計算される沿岸漂砂量との関係を示す。これより、深浅測量図から得られる沿岸漂砂量を与える砕波波向きは約 8° であることがわかる。以上により、代表波浪として波高 2.5m, 周期 8.5s, 波向き $N8^\circ E$ が得られた。

(b) 計算結果の考察

図-12 に各波浪条件に対する 1 ラインモデルによる汀線の変化の 1 例を示す。なお、用いた海底地形はもっとも古い 1977 年のものであり、20 年間の各年の計算結果を重ねて表示してある。これらの図から、つぎのことがわかる。1) 計算された汀線の変化は、実際のそれと対応している。漁港東側では沖の岩礁の影響のため、一様な西向き漂砂になっていない。2) 代表波浪による汀線変化がもっとも大きく、それより長周期の波浪の場合は、屈折により沿岸漂砂量が少なくなって小さくなる。3) いずれの場合も漁港西側では沿岸漂砂は少なく、汀線の後退も小さい。

5. 結 語

ここでは、新潟県の市振海岸を対象として、市振漁港の防波堤の延長に伴う海岸侵食の進行と最近の海岸決壊に至る過程を、資料解析と数値シミュレーションによって明らかにした。その結果を要約すると、つぎのようである。

1) 市振海岸では、1965 年頃から漁港建設による防波堤の延伸に伴って、西向きの沿岸漂砂が阻止され、その西海岸の侵食が助長されるようになった。そして、1987 年頃には前浜が消失した。その間、背後の護岸のかさ上げと消波ブロックの投入と平行して海岸侵食がさらに進み、もはや海岸侵食の段階から海岸決壊の段階に入っていることが資料解析から明らかにされた。

2) そこで、1 ラインモデルを適用して、まず、海岸

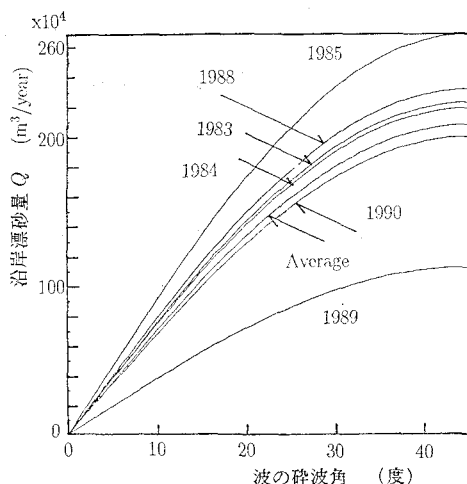


図-11 砕波角と沿岸漂砂量の関係

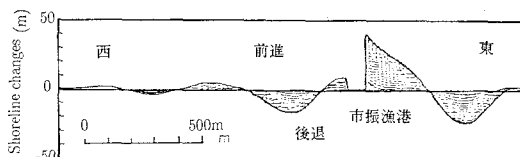


図-12 汀線変化量 ($\bar{H}=2.5$ m, $\bar{T}=8$ s, W.D.: $N7.5^\circ E$)

侵食の 3 つのステージを対象とし、代表波浪を入射波として、波浪の集中特性に関する検討を行った結果、時間経過に伴って、波のエネルギーフラックスの分布が沿岸方向に大きく変化し、かつその符号の逆転する付近で海岸決壊が発生していることが見いだされた。

3) ついで、数値シミュレーションによる汀線変化の計算値と実測値がかなりよく対応していることが認められた。

参 考 文 献

- 宇多高明ほか(1988): 新潟県市振海岸における海岸構造物設置に伴う海浜変形, 地形, 第 9 巻, 第 1 号, pp. 35-52.
- 土屋義人ほか(1981): 富山県宮崎海岸の海浜過程について, 京大防災研年報, 第 24 号 B-2, pp. 433-473.
- 土屋義人ほか(1992): 底質の分級作用を考慮した長期海浜変形予測モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 411-415.