

新潟海岸の大規模海浜過程と海岸侵食制御

土屋 義人*・山下 隆男**・泉 達 尚***

1. 緒 言

新潟海岸は信濃川、阿賀川の二大河川からの流送土砂によって形成された砂浜海岸で、以前は砂丘、砂堆の発達した堆積性海岸であった。しかしながら、明治29年から始まった新潟西港防の波堤建設、大正11年の大河津分水路通水に代表される信濃川の治水工事、昭和30年台からの地盤沈下を主な要因として著しい侵食性の海岸へと変化した。現在では、昭和22年から本格的に行われ始めた建設省、運輸省、新潟県による護岸、突堤、離岸堤等の海岸保全施設の整備により汀線の後退は食い止められているが、海岸侵食が終結しているわけではない。種々の海岸侵食防御施設が構築され、辛うじて汀線の後退を防御している現状で、砂浜海岸としての価値は極めて低い。信濃川からの流送土砂の減少と西防波堤による漂砂源の遮断に注目すると、新潟海岸の侵食は漂砂源の欠如による河口デルタの急激な縮小過程によるものであるといわなければならない。とくに、河口デルタは多量の流出土砂によって、徐々にではあるが前進し、拡大していたはずである。それが漂砂源の欠如によって均衡を崩し、デルタ地形の縮小といった形で海岸侵食が現れたことを考えると、その侵食過程がどれほど著しいものであるかが理解されるはずである。

この海岸では、従来より各種の侵食対策が実施されてきたが、次の二点が対策上の問題として提起できる。その第一は、この海岸の侵食過程を信濃川の河口デルタの縮小過程として理解し対処してきたかどうかということである。第二は、従来実施されてきた侵食対策のうち、原理的にこの海岸を安定化させるための工法がなされてきたかと言うことである。海岸侵食を長期的観点から制御することは、その海岸を安定化することであり、そのためには安定化できる何か原理的なものが存在しなければならない。そうでない限り、どのような対策工法を施工しても、いたずらに局所的な、一時的な海岸の保全に終わってしまうことになる。

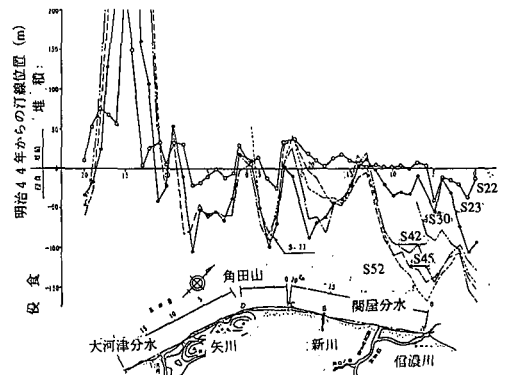
本研究では、新潟海岸の海岸侵食制御を土屋ら(1991)の言う大規模海浜過程として捉え、この海岸を安定化させて長期的に保全するための方法論とその具体的な工法について述べる。

2. 新潟海岸の大規模海浜過程

海岸の安定化を図り、海岸侵食を制御するためには、まず海岸侵食の主要因を明らかにして、それに伴う長期の海浜変形を予測することが重要である。これまでの多くの海岸についてそのような調査研究が実施されてきたが、ともすれば対象とする漂砂系全体についての検討を忘れて、現在侵食問題が顕在化している範囲だけを対象としている場合がある。ここでは新潟西海岸が信濃川河口デルタの一部であることに注目して、河口デルタの縮小過程としての大規模海浜過程を調べる。

2.1 新潟西海岸の概要

新潟西海岸は、1600年から1949年の間に94回も発生した洪水を防ぐため、明治時代以降に実施されたた信濃川の改修工事や治水工事により、河川からの流送土砂量が減少し、またその質も変化してきた。また、明治29年に始まった新潟西港防波堤の建設により西向き沿岸漂砂が遮断されたことが要因となって、侵食性の海岸に変貌していった。さらに、昭和30年頃から天然ガス採取のた



図一 信濃川河口から大河津分水に至る新潟海岸の汀線の経年変化（建設省北陸地方建設局による）

* 正会員 工博 名城大学教授 都市情報学部

** 正会員 工博 京都大学助手 防災研究所

*** 正会員 新潟県新潟港湾事務所所長

め多量の地下水の汲み上げに伴う地盤沈下が海岸侵食を助長した。沈下量は直轄海岸保全区域で大きく、昭和34年から昭和53年の間に約1.7mに及び、補助海岸保全区域でも約1.2-1.5mに達した。建設省北陸地方建設局(1981)の調査による信濃川河口から大河津分水に至る広範囲な汀線変化を示す図-1からは、新川が一つの海浜変形の境界条件となり、これ以西では汀線の前進、以東では後退がみられる。

2.2 新潟海岸の漂砂系と海岸侵食の主要因

(1) 新潟海岸全体の漂砂系

この海岸は信濃川の河口デルタ地形であり、後述するように、主要な波浪はNWからNNWおよびNNEからのものであるから、その形成には佐渡島による波浪の変形が影響したものと思われる。Nからの波浪の屈折を考えればわかるように、この海岸の岸線の方向が北東側より南西側に向かって次第に南向きとなっているため、屈折により波浪は海岸線に次第に直角に入射するようになり、その碎波角は信濃川河口付近より南西に向かうほど小さくなる。したがって、信濃川からの沿岸漂砂は主として西向きに輸送されるが、南西側に向かうほど通減する。

また、1959年から1961年にわたる三野ら(1963)による底質特性の調査結果、および1980年の建設省による調査結果からは、下新田付近までの沿岸漂砂は東北から南西に向かい、それより南西ではこれとは反対に東北に向かう漂砂が卓越することが推定できる。すなわち、これらの両者の間には沿岸漂砂がほとんど卓越しないところが存在することを示唆しており、これが現在の信濃川の河口デルタの南西端であろう。このような新潟海岸の基本的特性は、海岸侵食が著しく進んだ現在でも当然残されていると考えなければならない。

現在の新潟海岸は離岸堤の設置により汀線後退は抑えられているが、沿岸砂州は消滅し離岸堤前面は深くなってきており、新川港の北東側の海岸に沿岸漂砂が堆積している。この漂砂の堆積範囲は後述する河口デルタの縮小過程における堆積範囲に対応していると考えられる。

(2) 海岸侵食の主要因

大規模海岸構造物による海浜変形の要因としては、一般に、構造物により沿岸漂砂が阻止されることに起因する侵食(第1要因)と波浪場が変化することにより生ずる海浜循環流システムに起因する変動(第2要因)とに分けて考えることができる。前者によれば、海浜変形に対して構造物により沿岸漂砂が阻止されるという境界条件が与えられるが、その下手側では無限遠で汀線変化が存在しなくなるという境界条件となり、理論的には海浜変形は漂砂の下手側に無限に伝播する。一方、後者は防波堤による回折波により発生する循環流が汀線変化をも

たらすことになり、構造物の内側に漂砂が堆積することになるが、下手側への影響は構造物周辺に限られる。結局、大規模海岸構造物の周辺における海浜変形はこれらの要因に起因する変形の重ね合わせとその相互作用として考えられる。しかし、構造物が河口デルタ上に作られた場合には、前者の要因による海浜変形のうち、構造物から十分離れた地点での境界条件については条件そのものは同一であるが、前述した河口デルタの縮小過程に関する理論結果からわかるように、河口デルタの形成過程と関係して侵食によって生じた漂砂は必ずその下手側に堆積するという事に注目しなければならない。

新潟西海岸の場合には、信濃川河口からの漂砂源の減少に加えて、新潟港の築港に伴う沿岸漂砂の阻止、いいかえれば西海岸への漂砂源の欠如による信濃川河口デルタの縮小が起こり、これが海岸侵食の第1の要因となり、これに地盤沈下が第2要因として起こって海岸侵食を助長し、さらにそのための海岸侵食対策によって海岸線を死守してきた結果、海浜断面の変化をもたらした海岸侵食減少をさらに悪化してしまったと言えよう。このような半世紀における開発に伴う自然との葛藤の過程において、もし当初に河口デルタの縮小過程の本質を理解できておれば、もっと長期的な観点にたった海岸の安定化の方策を模索できていたかもしれない。

2.3 長期汀線変化の予測

(1) 来襲波浪特性

新潟海岸における波浪観測は、当初種々の方法で試みられたが、昭和38年から新潟県によって寄居浜沖(水深12~14m)で、昭和47年からは運輸省新潟港工事事務所により、水深23mの地点で海底設置型超音波波高計による観測が行われてきている。また、ミリ波レーダーによる波向き観測も、昭和46年から行われている。これまでに調査された結果を基にして、来襲波浪の特性を検討すると、波浪条件としては、1) 構造物等の設計波浪としては、有義波高8mおよび有義波周期10-14secで、その波向きはNNW-NW、および2) 海浜変形に対する代表波浪としては、有義波高3mおよび有義波周期7-9secで、その向きはNNW-NWとなる。

(2) 深浅測量図による沿岸漂砂量の推定

土砂収支の観点からすれば、離岸堤および突堤等の設置や維持のために投入された捨石およびコンクリートブロックの量は人為的な土砂供給に相当する。ここでは、深浅測量図からの沿岸漂砂量の推定に加えて、人為的に投入された捨石およびコンクリートブロックの体積を明らかにしておく。新潟港から関屋分水路河口までの深浅測量は、新潟県および運輸省により実施されており、昭和55年から59年の深浅測量図から得られる沿岸漂砂量は4,000 m³/yrと推定された。また、捨石およびブロック

の投入量は新潟県新潟土木事務所により、昭和24年から平成元年までの調査結果がまとめられており、昭和23年から63年までの間の投入による単位面積当たりの年平均供給量は、地域により異なるが、 $4.14 \sim 8.68 \times 10^{-3}$ ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{yr}$)である。

(3) 汀線変化の長期予測

1ラインモデルにより長期的な汀線変化を予測する場合の代表波浪を推定し、もし新潟西海岸の侵食が人為的に防御されなかったと仮定すると、現在どの程度の汀線後退が生じていたかを予測する。この場合、海浜変形の代表波浪を用いる。

ここでは汀線変化予測モデルを用いて、長期の汀線変化を予測するための波浪条件を推定する。すなわち、卓越する来襲波浪の有義波高と周期および汀線変化に関する情報が得られておれば、代表的な波浪特性を表わす波高および周期を仮定して汀線変化の追算を実施し、追算の一致の程度からその他の波浪特性（波向きおよび波浪の来襲率または年平均の継続時間）を見出すことができる。さらに、複数回の深浅測量結果があれば、沿岸漂砂量の沿岸方向分布が推定でき、代表波浪を適用した1ラインモデルから計算される沿岸漂砂量の沿岸方向分布と比較することで、代表波浪の有意さを判断することもできる。

ここでは以下のような方法を用いた。1) 卓越する来襲波浪の特性としては、代表波浪として波高3mおよび周期8secとし、その波向きをNNW-NWとする。2) 汀線変化データとしては、地盤沈下の影響が顕著でない明治44年を基準とした昭和6年および22年のものを対象とすることができる。

これらの諸条件のもとに、長期の汀線変化を追算できる波浪条件を次のように確定する。まず、波高および周期を固定し、NNWからNWの間にあると推定される波向きを 11.0° 、 16.5° および 22.5° の3ケースに分け、それらについて汀線変化を追算した。 16.5° の場合の結果を図-2に示す。漂砂の移動限界は $h_k=10\text{m}$ として、計算

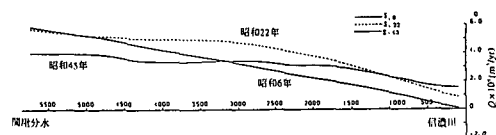


図-3 1ラインモデルによる汀線の追算から得られた信濃川河口から関屋分水に至る新潟海岸の沿岸漂砂量の沿岸分布

された昭和6年、22年、平成2年および平成12年(2000年)の汀線変化(上図)と沿岸漂砂量の分布(下図)を示す。汀線変化の図には明治22年(1889年)を基準として昭和6年および22年の汀線の位置を○および+印で示してある。一連の計算結果から判断して、汀線変化および沿岸漂砂量の追算結果のオーダーとそれらの傾向から汀線変化をよく説明することのできる波向きは 16.5° であることがわかった。その場合の昭和22年の沿岸漂砂量は約 $30,000$ (m^3/yr)であると推定された。

一方、図-3には、実測の汀線の変化を1ラインモデルで最も良く再現できる沿岸漂砂量の沿岸分布を昭和6、22、45年について計算した結果を示す。これによると、昭和22年の沿岸漂砂量は約 $40,000$ (m^3/yr)であり、代表波浪を用いて追算した上述の計算結果と良く一致している。これより、ここで設定した代表波浪が長期の海浜変形を比較的うまく説明できる波浪条件であると判断される。

ここで、昭和55年から59年における深浅測量から推定された沿岸漂砂量は約 $4,000$ (m^3/yr)であったが、汀線変化の追算から得られた値 $30,000$ (m^3/yr)と比べて1オーダー小さい。このことは、汀線の後退にしたがって碎波角が減少してきていることに加えて、現状では漂砂帯の8割近くが人為的防衛工で覆われていることを示していると考えられる。

3. 安定海浜の形成による海浜の安定化

3.1 海浜の安定化の方法論

まず、第一例は漂砂源が変化した場合の河口海岸の侵食制御である。漂砂源としての河川からの流出土砂量が減少すれば、河口付近の漂砂の下手側の海岸は侵食される。この場合の侵食制御としては、1) 漂砂源を積極的に復元させるか、2) 漂砂源の変化に対応させて沿岸漂砂量を制御し、安定な海浜群を形成させるかの方法が考えられる。安定海浜工法を適用した場合の方法を図-4に示す。このように、海岸線の傾きを少しだけ変えることにより、主波浪の碎波角を減少させて沿岸漂砂量を制御し、動的または静的に安定な海浜群を形成させることができるはずである。

次に、大規模海岸構造物による侵食は、その原因とし

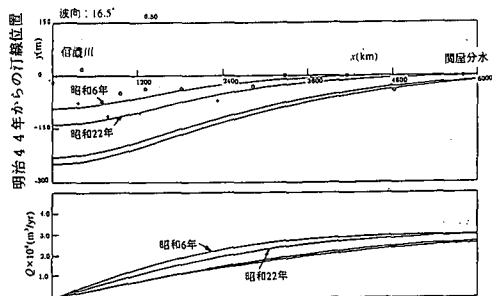


図-2 信濃川河口から関屋分水に至る新潟海岸の汀線変化の追算および長期予測結果

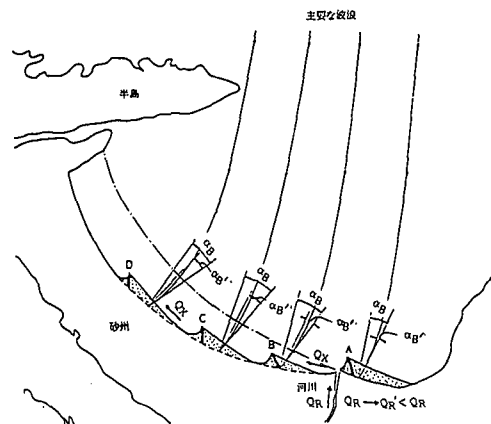


図-4 河口デルタの縮小に伴う海岸侵食を制御するための安定海浜工法の適用例

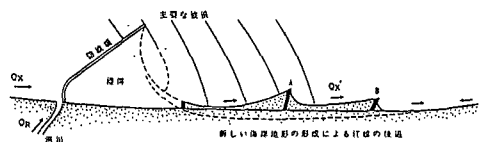
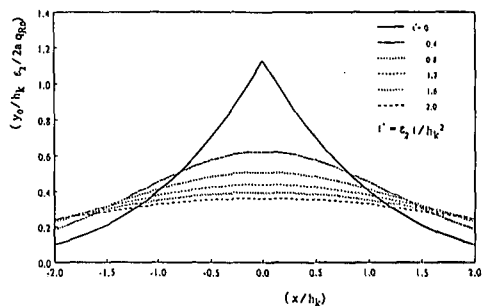


図-5 大規模海岸構造物による海岸侵食を制御するための安定海浜工法の適用例

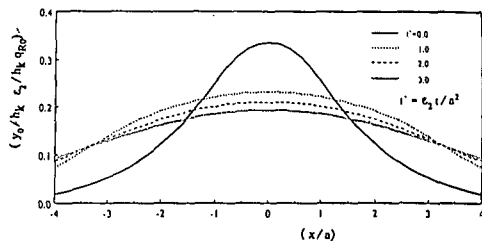
て、1) 沿岸漂砂の阻止と、2) 海岸構造物による波浪特性の変化とそれによる海浜流系の変化による侵食とが重なって起こる。従来、このような場合には、侵食防止のため護岸、離岸堤などを設置してきたが、護岸条件に応じた新しい海浜が形成されるだけで、それが安定化する保証は何もない。海浜を安定化させるためには、たとえば図-5のように海岸構造物に対応したもう一つの海浜変形の境界条件として、その下手側に岬を設け、その間にサンドバイパスすれば動的に安定な、また静的に安定な海浜が形成できるようにすればよい。

3.2 河口デルタの縮小過程

河川からの多量の流出土砂による河口デルタの形成過程から、流出土砂量の急激な減少による河口デルタの縮小過程への移行に関する理論的研究 (Refaat & Tsuchiya, 1992) によれば、波浪が海岸線に対して直角に入射し、河口漂砂源が点源であるとした場合と、有限の河口幅をもつ場合について、河口デルタの発達後の漂砂源の欠如による海岸侵食を調べた結果が図-6(a), (b)である。これらの結果によると、漂砂源の欠如による海岸侵食は、河口付近がきわめて著しく、漂砂源の欠如とともに直ちに発生する。そして、注目すべきことは、その侵食された土砂が沿岸漂砂の下手側、すなわち河口デルタ地形の変曲部分に堆積することである。いいかえれば、もし漂砂源の欠如だけによって海岸侵食が起こった場合



(a) 漂砂源を点源とした場合



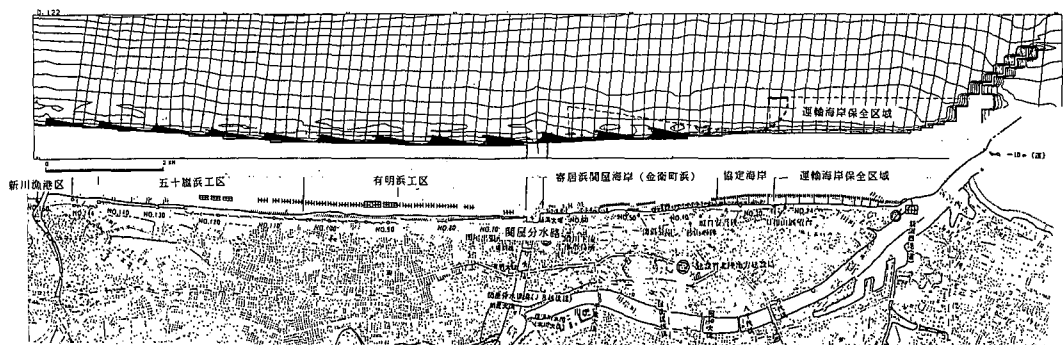
(b) 有限河口幅の漂砂源の場合

図-6 河口デルタの縮小の理論解 (Refaat & Tsuchiya, 1991)

には、河口デルタ地形の変曲部分に著しい堆積が起こってもおかしくない。このような結論はたとえ漂砂源の欠如によって海岸侵食が起こっても、海浜断面は変化せず、変形前と同じ反射特性を有するものと仮定したことに留意するべきである。しかし、実際には種々の侵食対策工法を実施して、結果的には海浜断面の改変をきたしてしまっただけであるので、侵食土砂のほとんどは沿岸方向に若干は流送されたにせよ、その多くは沖方向漂砂としてもはや海浜には再帰しないものとなってしまったのであろう。もし新潟海岸の侵食が始まったときに、このような自然の仕組みがわかっておれば、河口デルタの下手側に堆積したであろう土砂を定期的にサンドバイパスすれば海浜はいまよりも残されていたのかも知れない。

3.3 安定海浜群の形成

以上の調査結果から、どのような安定海浜群が形成できるかを考える。安定海浜の形成に関する理論によれば、卓越波浪が存在して沿岸漂砂量が沿岸方向に一定のとき、沿岸漂砂の上手および下手側における海浜変形の境界条件がそれぞれ存在しさえすれば、そこには唯一つの安定海浜（または、平衡海浜）が形成されることになる。ただし、その形状は、前述したように、卓越波浪の波向きのほか、境界条件（たとえば、ヘッドランド）の規模、とくにその沖方向の長さとその間隔に依存するので、全体の沿岸漂砂系において海浜の安定を漂砂の連続性の確保の観点においてどう配置するかが重要である。また、実際的には安定海浜の背後地をどのように利用す



図一 信濃川河口から新川に至る新潟海岸に安定海浜工法を適用した場合の安定海浜群の配置

るかによって、その規模を決めるべきであろう。ここでは、信濃川河口より新川までの区間に適切な間隔で Hsu ら (1978) の平面形状にしたがって安定海浜を形成させる。一つの安定海浜の延長、すなわち海浜変形の境界条件としてのヘッドランドの間隔を 1,000 m として考え、主波浪の波向きとして NNW 3°W (16.5°) を用いる。まず、関屋分水から沿岸漂砂の上手側 (北東側) に向かって安定海浜群を形成させ、つぎに下手側 (南西側) に対して新川付近で現状の海浜に接続するように安定海浜群を配置すると、図一7 のようになる。この場合の安定海浜群は信濃川河口からの漂砂源がほとんど存在しないことから、いわゆる静的に安定な海浜である。しかし、実際にはヘッドランドの沖側端部の水深を 7 m としてあるので、これより沖側に沿岸漂砂が存在するような波浪条件もあるわけであるから、そのときには若干沿岸漂砂が下手側に流送されることになる。このような条件において安定海浜を形成させるためには、この分に対応する沿岸漂砂量を定期的に供給する必要がある。一方、関屋分水河口から下手側については、ここで示した安定海浜群はむしろ堆積性の傾向を示すであろうが、その余剰の漂砂はサンドバイパスによって安定海浜群の維持に利用すべきであろう。

このように安定海浜群を形成させるためには、その施工順序が大変重要になるはずである。とくに、注意したいのは関屋分水河口から上手側であるが、関屋分水河口には漂砂源があり、それが主として南西方向に向かうことから、この河口の東側のヘッドランドから上手側に順次施工していくのが理想的であろう。もちろん、関屋分水河口から下手側では、できれば新川河口から上手側にそれぞれ順次施工できれば理想的であろう。また、ヘッドランドとしてはどういうものが安定海浜を形成させるのに効果的であるかは、現実に施工してその経験から創意工夫していかなければならないが、理想としては低反

射で構造物自身の海浜変形に及ぼす影響が少ないものほどよいと思われる。

4. 結 語

新潟西海岸の主要な侵食原因を河口デルタの縮小過程としての大規模海浜過程として捉え、この海岸を安定化させるための方法を示した。

1 ラインモデルによる汀線変化の追算結果から、海浜変形の代表波浪の波向きは NNW 3°W であり、昭和 22 年頃の沿岸漂砂量は約 30,000 (m³/yr) であると推定された。また、昭和 55 年から 59 年における深浅測量から推定された沿岸漂砂量は約 4,000 (m³/yr) であり、自然海浜を仮定した 1 ラインモデルから計算された値より 1 オーダー小さい。これは、汀線の後退にしたがって碎波角が減少してきていることに加えて、漂砂帯の 8 割近くまでが侵食防御工で覆われているためであることが示された。

さらに、新潟海岸の海岸侵食に対して、長期的な観点からその安定化を図る方法について検討し、静的に安定な海浜群を造成することによってこの海岸の安定化を図る案を提示した。

参 考 文 献

- 土屋義人, 山下隆男, 都丸徳治: 大規模海岸構造物による海岸侵食の機構, 海岸工学論文集, 第 38 巻, 1991, pp. 436-440.
- 三野与吉, 町田 貞, 荒巻 孚, 山内秀夫: 新潟海岸の海浜堆積物からみた沿岸流の卓越方向について, 東京教育大学地理学研究所報告, VII, 1963, pp. 1-22.
- Refaat H. E. A. A. and Y. Tsuchiya: Formation and Reduction Processes of River Deltas; Theory and Experiments, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 41, 1991, pp. 177-224.
- Hsu, J. R. C., R. Silvester and Y. M. Xia: New characteristics of equilibrium bays, Proc. 8th Australian Conf. Coastal and Ocean Eng., 1978, p. 140-144.
- 建設省北陸地方建設局, 新潟海岸保全全体計画, 1981.