

海岸構造物による海岸侵食とその制御 (3)

——安定海浜工法による海岸侵食制御の方法論と
安定海浜の形成に関する実験——

土屋 義人・河田 恵昭・山下 隆男・松井 進*

BEACH EROSION BY COASTAL STRUCTURE AND ITS CONTROL (3) ——PRACTICAL METHODOLOGY FOR BEACH EROSION CONTROL BY HEADLANDS AND EXPERIMENTS ON THE FORMATION OF STABLE SANDY BEACH——

By Yoshito TSUCHIYA, Yoshiaki KAWATA, Takao YAMASHITA and Susumu MATSUI*

Synopsis

In the third report, based on the numerical results of large scale coastal behavior and methodology for stabilization of Joetsu-Ogata coast, a practical methodology for beach erosion control by headlands is first proposed. The practical application is proposed for stabilizing Joetsu-Ogata coast by formation of a series of stable sandy beaches.

Secondly, experiments on the formation of stable sandy beach were carried out to examine the applicability of the proposed methodology for beach erosion control by headlands. In order to compare the hydraulic performances of the methodology for beach erosion control by headlands with other methods such as detached breakwaters in the stabilization of the sandy beach which is being eroded, by use of the similitude of beach change by Ito and Tsuchiya, the physical scales of the model experiment was determined, a series of experiments of the formation of stable sandy beach and beach changes by the methods were then conducted. The changes in shoreline and bottom topography after employing these methods for beach erosion control were observed and compared to find which method can stabilize the sandy beach in a long term sense. In the case of detached breakwaters, tombolos are generally formed in relation to the length of the breakwater and its onshore distance from the shoreline, but a couple of detached breakwaters spaced considerably are needed as headlands to stabilize the sandy beach. In the case of headlands, however, when a comparative condition in formation of sandy beaches by headlands is made, a stable sandy beach can be formed well between the headlands.

緒 言

本文では、まず第2報¹⁹⁾で述べた大潟海岸の大規模海浜過程の研究結果を始めとするこの海岸の特性に基づいて、長期的な観点から海岸の安定化を図る方法論を展開し、安定海浜工法の適用による実用的な方法を提案するとともに、その施工に当たっての基本的事項とくに安定海浜を形成させるためのヘッドランドの

* 新潟県新潟土木事務所長 (前土木部河川課長)

規模および配置とそれらの構造、およびその施工順序などについて考察する。

ついで、提案した安定海浜工法によって果たして安定海浜群が形成できるかどうか、そのための養浜の方法を検討するために、水理実験によって検討した結果について述べる。最近の土屋²⁰⁾、土屋・Refaat²¹⁾、および土屋・陳・和田²²⁾の研究によれば、適当な海浜変形の境界条件が存在すれば、そこに安定な砂浜海岸が形成されることが理論的に確認できたので、果たしてこれが実際の海岸で形成されるかどうか、またされるならばどう言う条件で形成されるかを見いだすために一連の実験を実施した。その場合、従来の工法とどこが基本的に相違するのを見だし、またそれらの適用性を検討する。その結果、確かにある条件が満足されたとき、そこにはじめて安定な海浜が形成されることが見いだされたので、安定海浜工法による長期海浜の安定化が原理的に可能であることが示される。

7. 上越、大潟海岸の海岸侵食制御の方法論（安定海浜工法の適用）

7.1 海岸侵食の主要原因とそれに対する侵食制御の理念

まず、この海岸侵食の主要原因は、いうまでもなく直江津港の築造に伴う漂砂源の欠如であり、それは東側の海岸においてその影響はそのまま現われ、Fig. 2.1 に示したように、この原因による侵食範囲はしだいに東側に拡大するはずである。第2の原因は、直江津港の防波堤による波浪特性の変化によるものであり、これは海浜過程そのものを根本的に変化させてしまっているはずである。けれども、この原因による海岸侵食は東側の海岸全域に拡大していく性質のものではなく、防波堤の規模、とくにその延長、防波堤先端の離岸距離、および波向など波浪特性に関係するある限定された範囲にとどまるはずである。これら両者の主要原因による侵食範囲の究明は、理論的に汀線変化および海浜流の予測モデルを適用することによって行うことができるので、第2報では大規模海浜過程の考察において論じたところである。さらに第3の原因は、護岸、海岸堤防あるいは離岸堤による反射波の影響によるもので、これは沖方向の漂砂の発生を助長し、構造物前面の水深を深くして海浜断面そのものの著しい変化として現われ、その付近の底質はかなり沖側へ移動し、堆積することになる。すなわち、海浜断面の変化の一例を Fig. 7.1 に示すように、この海岸は元来、波浪エネルギー消散型（dissipative beach）の海浜であったものが、前述した反射波の発生に伴って、波浪エネルギー反射型（reflective beach）へと急激に移行してきている。これは海岸侵食に伴う自然のプロセスではなく、むしろ人為的に海浜をそのようにせしめているわけである。すなわち、このことは次の2つの事実によって理解されるであろう。その1つは、従来の侵食対策においては、前述したように第1および第2の原因によって海岸侵食が起こっているにもかかわらず、海岸線を現状に近い状態、いいかえれば直線

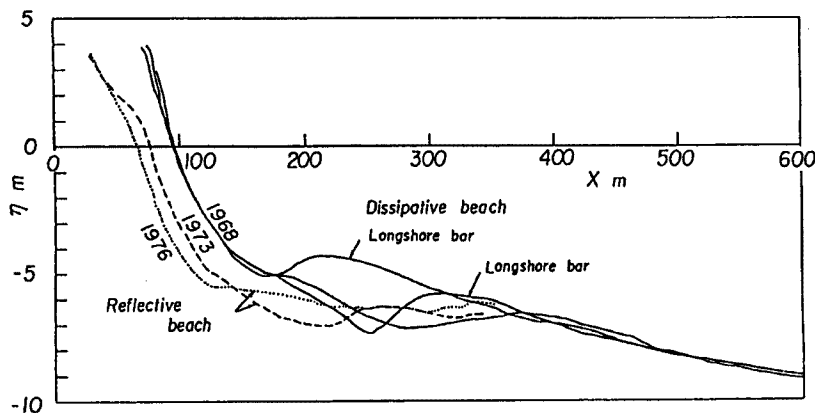


Fig. 7.1. Change in beach profile from wave energy dissipative beach to reflective one in progress of beach erosion in Joetsu-Ogata coast.

状の海岸線のままで、汀線を後退させないように（しかし、実際にはある限られた期間だけそうであるが、数年と経ないうちに、カストロフィックに汀線は後退する、度重なる堤防などの破壊に対して護岸または海岸堤防などを再築造してきた。これに対して、自然はしばらくの間、その汀線の状態で我慢しているようにみられるが、その間に、護岸などの前面にある底質を沖方向に運び、その前面水深をしだいに深くして、やがては護岸や堤防本体を破壊せしめてしまう。これらは構造物に対する自然の反作用であって、何とかして本来の波浪エネルギー消散型の海浜、すなわち元の姿の海浜にもどろうとするのである。また、この海岸でたびたび起こっているように、護岸や堤防が破壊され、それが少し海中に埋没するようになると、その背後地の海がけをけずってそこには新しい砂浜が形成される。これなどはいうまでもなく、反射型の海浜に人為的にされてしまっは、自然はどうしても安心できず、元の消散型の海浜に速やかにもどろうとしているのである。

こうした砂浜の基本特性は、そこに存在する底質とそこに来襲する波浪によって定められているもので、人為的にこれを変えることは不可能である。たとえ、ある期間に限り構造物によってその特性を変えたとしても、前述したような自然の反作用によって破壊され、元の姿に戻ろうとするその行為をわれわれは経験させられるだけである。海岸侵食を制御しようとする場合には、この事実を肝に銘じて、決して自然の性格に逆らってはいけないのである。いいかえれば、波浪エネルギー消散型の海浜は、人為的には反射型の安定した海浜にすることは原理的に不可能であり、もし人為的に反射型の海浜にしつつあるようであれば、直ちにこれを消散型の海浜に近づける対策をとらなければならないのである。これが砂浜を海岸侵食から守り、それを安定化させる基本的理念であり、それに最も忠実な具体的な侵食制御法の1つが安定海浜工法である。

さて、この第3の原因による海底地形の変化とその影響範囲は、当然これらの構造物の構造のみならず、その設置位置や前面における砂浜の規模などに関係する。けれども、砂浜が形成されさえすれば、この原因による地形変化は必然的に解消されるものであるもので、ここでは第1および第2の原因を対象として、海岸侵食制御の理念を考える。

第1の原因による海岸侵食を制御するためには、原理的に漂砂源の欠損分をサンドバイパスすればよいが、一般にはこれを実施するとすれば恒久的に実施しなければならないことになる。ただし、連続でなくても、数年毎に断続的に実施しても、原理的には可能である。できれば、サンドバイパスする漂砂量を最小にするような配慮が必要であり、そのためには静的に安定な海浜を形成させれば、その目的を理論的には達成させることができる。しかし、後述するように、それはヘッドランドを碎波帯より沖側に設置できない限り、原理的には不可能である。

これに対して、第2の原因による海岸侵食の範囲は、たとえば大局的には防波堤先端から主波浪が屈折して進入してきて海岸線に到着する地点から、ほぼ防波堤先端の離岸距離程度のものである。実際、Fig. 7.2に示すようなこの海岸における汀線の経年的な沿岸方向の変化からすれば⁴⁾、新堀川付近がその限界ではないかと判断される。このことは第2報においてこの海岸の大規模海浜過程においてどこに海浜変形の境界条件を設置すればこの海岸を安定化できるかを調べた結果によれば、ちょうどこの付近であることが判明している。その侵食制御の方法論としては、海浜変形に及ぼす防波堤のそのものの境界条件としての直接的な影響をどうして補正し、安定な海浜として形成できるようにするかである。

このように、本海岸の海岸侵食制御においては、主原因ごとに、安定な海浜群を形成させる方策をかえて対応すべきであろう。

7.2 具体的な安定海浜群の形成方法

前述した2つの主要な侵食原因から、大渦海岸における海岸侵食制御の方法論としては、まずこの海岸をつぎのように2つの区域にわけて取扱うべきである。

（1）直江津港より新堀川河口付近までの区域：この区域は、前述した侵食制御の理念からすれば、第1および第2の原因によって侵食されてきたわけであるから、その具体的な侵食防止対策としては、次のよう

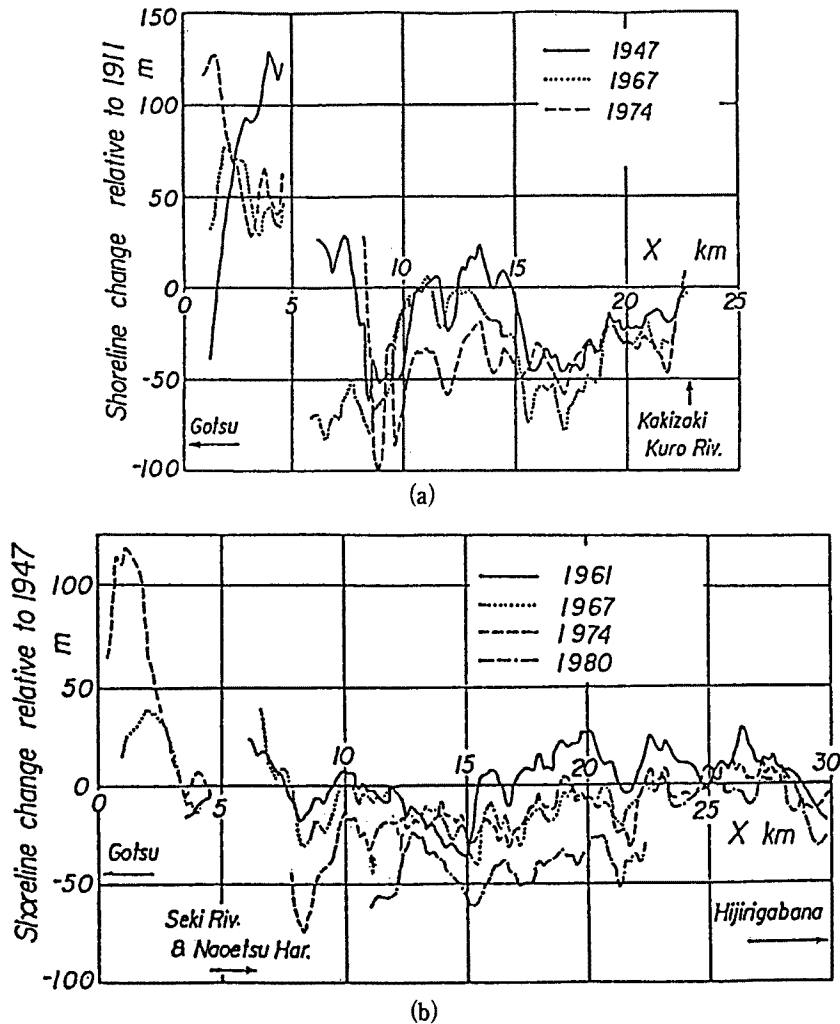


Fig. 7.2. Temporary and spatial changes in shoreline in Joetsu-Ogata beach due to construction of Naoetsu harbour.

に考えるべきである。直江津港、とくにその防波堤は前述したように大潟海岸の海浜変形における人工的な境界条件に対応し、その影響はきわめて著しいわけであるので、これを補償するための数個の人工的な海浜変形の境界条件を作り、それらによって囲まれた海浜が安定な砂浜として存在できるようにする必要がある。

上越、大潟海岸の中部には柿崎川が流入し、その左岸側の導流堤の西側には漂砂が堆積して砂浜を形成していたが、最近柿崎漁港のため防波堤が建設されたので、それらの区間は一つの砂浜が形成されつつある。第2報で検討した大規模海浜過程における年平均沿岸漂砂量の沿岸分布によれば、上越、大潟海岸が全体として一つの弓型のほぼ安定した地形を形成しているが、この地域はそのちょうど中央部分にあり、両方からの沿岸漂砂の集積する傾向にあり、長期的には若干堆積傾向にあるところである。このことは、また沿岸漂砂の方向が波浪特性に応じて変化しやすいところでもあろう。それより推定される沿岸漂砂量はこの付近では数千 m^3/yr 以下であろう。この事実に加えて、鵜の浜付近より東側では、現在著しい海岸侵食は起こっていないので、この付近までを当面の海岸侵食制御の対象区域と考えてよい。

安定海浜の平面形状に関する Silvester⁵⁾ や土屋・芝野・西島⁶⁾ の研究、または離岸堤背後に形成されるト

ンボロ地形の平面形状に関する最近の Hsu・Silvester・Xia⁷⁾の研究によれば、たとえば静的に安定な海浜の形状はその境界条件としての両端のヘッドランドの間隔および主波浪の波向によって実用的に定められる。そして、波向が海岸線に直角に近いほど、ヘッドランド間隔が一定であれば、砂浜の湾入は大きくなり、また波向が一定であれば、その間隔が広いほど湾入が大きくなる。いいかえれば、現状の汀線より後退させないように、安定な海浜を形成させることを計画する場合には、もし波向が一定であると考えれば、ヘッドランド間隔を広く計画すればするほどヘッドランドの離岸距離を大きくする必要がある。また、そうすればするほど広大な砂浜を有する安定な海浜が形成されることになるわけである。

この場合、どのような方法で前述した人工の境界条件を補償すればよいのかについて考えてみよう。この大規模な境界条件をただ1つか2つの補償境界条件によって、その直接的な影響を補償するとすれば、それらの影響がさらに漂砂の下手側に伝播するであろう。したがって、前述したように、鵜の浜付近でヘッドランド間隔が200 m、すなわちあまり大きなヘッドランドとせず、現在設置されている離岸堤より小規模の構造物で安定海浜を形成させるように計画し、その間におけるヘッドランドの規模を指数関数的に減少させるようにしよう。そして、人工の境界条件として直江津港の防波堤の東端から、最初の補償境界条件までの距離を約1.5 km（この地点は大体波向 WNW の波に対して防波堤による遮への限界にあたるであろう）とし、それ以降の補償境界条件としてのヘッドランドの規模、とくに間隔を指数関数的に変化させることにし、新堀川河口付近までそれを設置することにする。

Fig. 7.3 は、この考えによってヘッドランド間隔を決定した結果である。図中、 x は防波堤の東端からの東向きに測った沿岸距離である。これにより、補償境界条件としてのヘッドランドを A, B, C, D および E を設置することにすれば、それらの間隔は図に示すように、それぞれ 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 km とすれば、偶然にも指数関数的に変化させた関係によく対応させることができる。もちろん、ヘッドランド群およびそれによって形成されるであろう砂浜をどのように利用するかによっては、これらの補償境界条件としてのヘッドランド群の間隔を変えることもできるはずである。ただし、できるだけ海岸には人工の構造物を最小限に建設するという思想に立てば、もちろん、このような考えでなく、海岸の利用面からもっと大規模な砂浜を形成されることも原理的には可能であるが、そのために建設されるヘッドランドなどのさらに沿岸漂砂の下手側への影響に対して十分な配慮が必要であることを忘れてはならない。

(2) 新堀川河口付近から鵜の浜までの区域：前述したように、この区域は第1の侵食原因によって海岸

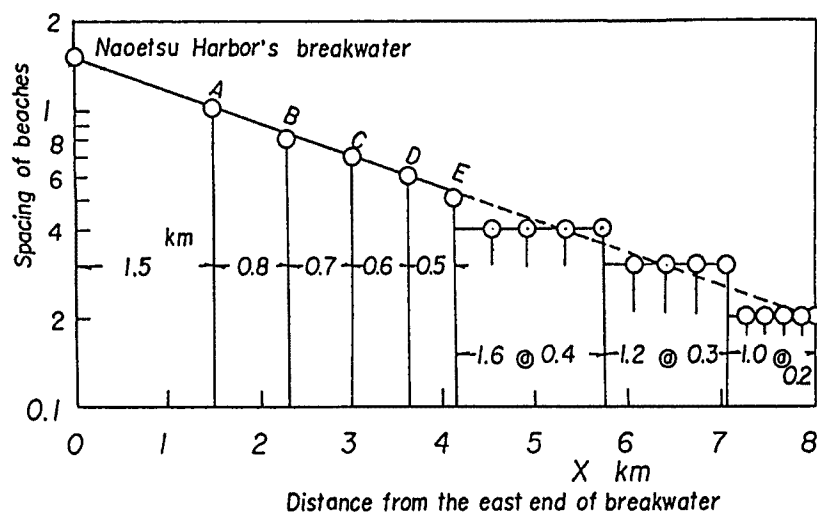


Fig. 7.3. Practical determination of headland spacing in relation to reduction of direct influence of Naoetsu harbour on beach erosion.

侵食されているわけであるので、沿岸漂砂が欠如しても原理的に存在する静的に安定な海浜群を形成させればよい。そうすれば、第3の原因としての護岸、堤防などによる反射波による沖方向漂砂の発生による侵食は自然と制御されるはずである。

では、どの程度の規模のヘッドランドによって、安定な砂浜を形成させるかであるが、あまり大きな構造物としない方が、局所的な波の反射を増大させないことから考えても有利であろうから、Fig. 7.3 に示したように、沿岸方向のある区域ごとにそれぞれ数基のヘッドランドを作るのがよいであろう。そして、いたずらに現在の海岸線を死守するように考えるのではなく、平均的にそのような状況となることで満足することにして、ヘッドランド間にはかなり湾入の大きい安定な砂浜が形成できるようにすべきであろう。こゝまで、海岸侵食が進んでしまえば、この程度の犠牲はやむを得ないように思われる。

以上、この海岸の侵食制御の方法論として、そこに存在する侵食原因とその影響範囲から2つの区域にわけて、できるだけ安定な海浜群を形成させるための具体的な方法について述べたが、さらにヘッドランドの設置水深と沿岸漂砂、または安定海浜の形成条件との関係について考察しなければならない。ヘッドランドの設置水深が碎波帯より以深にあって、漂砂の移動限界水深より沖側である場合には、ヘッドランド先端を通過する沿岸漂砂量は存在しないことになる。したがって、この場合には、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。これに対して、碎波帯内にある場合には、ヘッドランド先端を通過する沿岸漂砂が存在することになり、そこに形成される安定海浜は沿岸漂砂量が一定であるいわゆる動的に安定な海浜となり、漂砂の下手側には沿岸漂砂が存在することになる。そのため、これらの海浜群が安定であるためには、その下流側からの沿岸漂砂量またはそれ相当量の漂砂を最上流側のヘッドランドまでサンドバイパスする必要がある。これは漂砂の連続性の確保であって、できればこのサンドバイパスすべき漂砂量ができるだけ少なくてよいような海浜群を形成させるべきことになる。

上越、大潟海岸における年平均沿岸漂砂量は場所によって変わるが、最大で数万 m^3/yr で、安定海浜群が形成されると、それはたかだか数千 m^3/yr 程度になるであろうと推定されるので、このような観点から安定海浜群、とくに動的に安定な海浜群を形成させることは、原理的にはさほど難しいことではないであろう。ただし、この海岸における卓越波浪は前述したように NW から WNW の波浪であるが、この場合は周期 8 sec 前後のものである。しかし、発生頻度はそれほど高くないが、いま1つの卓越波浪があり、それは N または NNE からのいわゆる寄りまわり波とよばれるうねりであって、その周期は 10 から 12 sec になる。したがって、ヘッドランド群による海浜群の形成においては、多くの場合前者の卓越波浪によってそれが形成されることになるが、後者の波浪（うねり）によって若干変形されることに注意すべきであろう。このことについては、すでに山下・土屋・熊谷²³⁾によって安定海浜の形成過程を3次元海浜変形予測モデルによって詳細に検討しており、それによれば養浜砂量を適当にして初期地形をできるだけ安定海浜形状に近づけて実施すれば、主要波浪の波向が変動しても、安定海浜が十分形成されることがわかっている。

以上述べた考え方によって、具体的にどのような配置によって安定海浜群を形成させるのか、具体例を Fig. 7.4 に示す。これは直江津港の東端から約 1.5 km のところに、最大のヘッドランド A を設置し、それよりヘッドランド B, C, D および E によって、第1および第2の侵食原因の共存する第1区域の侵食制御を図ろうとするものであり、それより東側の第2区域においては基本的に第1の侵食原因のみ考えればよいので、ヘッドランド E の影響を除々に減少させ、かつ鵜の浜付近で現状に近づけることとし、ヘッドランド間隔をそれぞれ 0.4, 0.3 および 0.2 km としたものである。ただし、新堀川河口および大潟漁港（本漁港計画にあたっては、新堀川河口に併設するよう意見書を提出しておいたように²⁴⁾、今日にいたってこの計画が若干支障を来すことがわかるであろう）が不動の構造物となっているため、この付近の計画が必ずしも理想的ではないといえる。

Fig. 7.4 に示した安定海浜の形状は、Hsu・Silvester・Xia⁷⁾の最近の研究を用いて推定される汀線形状として表しているが、これはむしろ大体の安定海浜の形状と理解されるべきであろう。どのような安定海浜が形成されるかについては、前述したとおり山下・土屋・熊谷²³⁾の研究があり、養浜の方法と安定な砂浜の

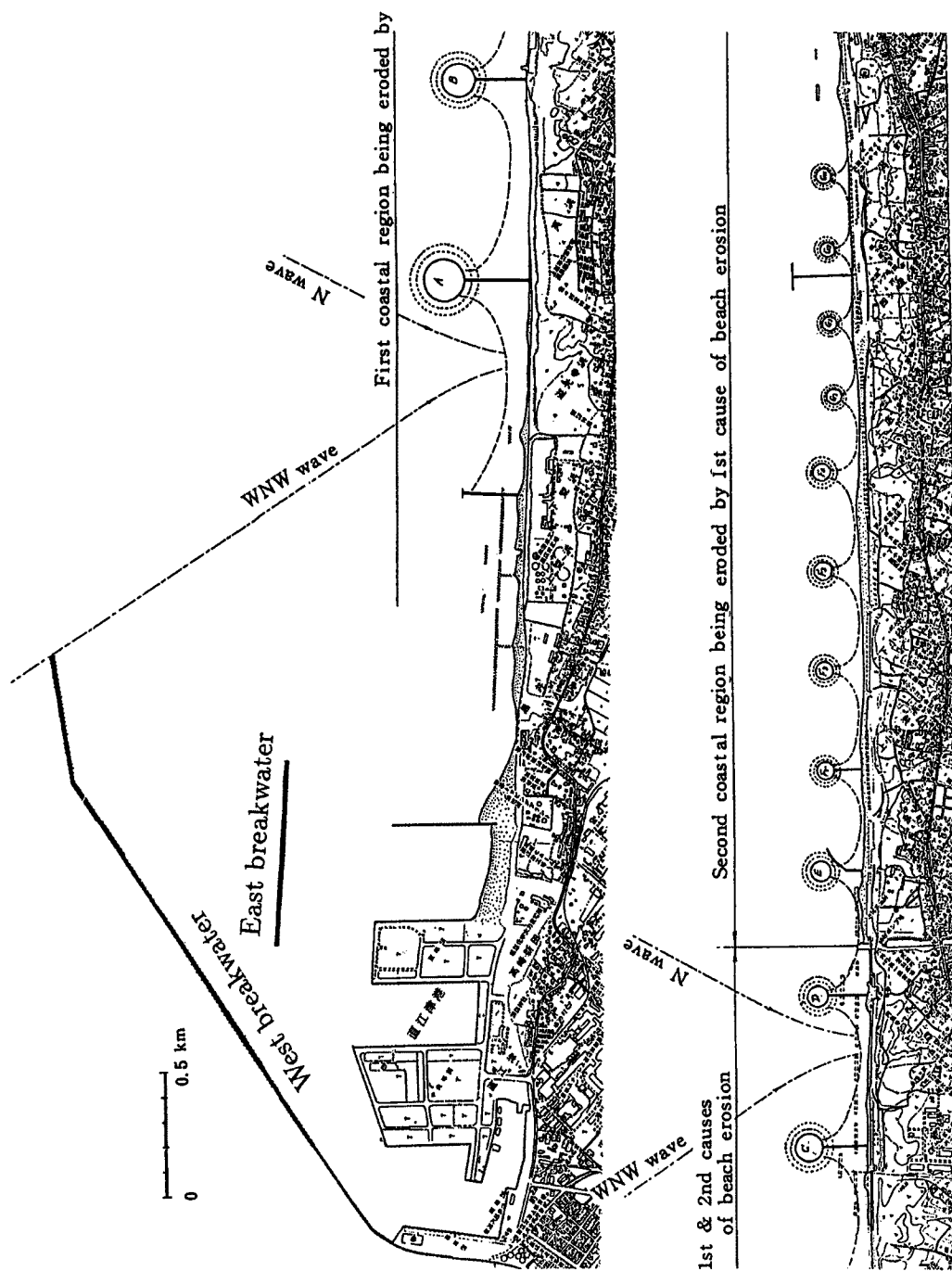


Fig. 7.4. A proposal to practical methodology for beach erosion control by headlands in Joetsu-Ogata coat.

形成が詳細に検討されている。

(3) ヘッドランドの構造と海浜の利用：安定な海浜が形成されるためには、ヘッドランドによる局所的な波の反射をできるだけ減少させなければならない。そのためには、ヘッドランドの構造をできるだけ緩傾斜のものにすることが肝要である。通常、この種の海岸構造物は、それ自身の波の作用に対する安全性の観点から検討されがちであるが、できるだけ自然にさからわない構造の方が期待される利点が大いといえる。また、他方ではその背後地、または形成された砂浜の利用とも関係するので、その利用計画をできれば地域計画ぐらいの規模で検討しなければならない。これらの安定海浜群を形成させるためには、具体的には数多くのヘッドランドを設置し、また必要な養浜を実施して、初期の砂浜を造成しなければならないので、かなり多額の経費を必要としよう。しかし、それは現存するような多数のコンクリートブロックを用いた各種の構造物で、これからさらに進行するであろう海岸侵食に対処することを考えれば、その経済的評価からはかえって有効なものとは判断されるのではなかろうか。海岸侵食が進むと、それに従って護岸、海岸堤防の法先水深がしだいに深くなっていき、そのためにより大きなコンクリートブロックを必要とすることになる。その一例として、糸魚川海岸の例を Fig. 7.5 にあげる²⁵⁾。これは水深5m 等深線の離岸距離と使用したコンクリートブロック単体重量との関係であるが、水深5m の等深線が急速に岸に近づいており、それに伴って当初8 ton のブロックが13年経過した調査時点で、実に25 ton にもなっている。海岸侵食に伴って、急速に護岸、堤防の前面水深が深くなっているわけであり、このような海岸になってしまうともはや海岸を安定化することとはほど遠いといわなければならない。上越、大潟海岸においても、直江津港に近いところでは、すでにこのようなプロセスを経ていることはよく知られているところである。

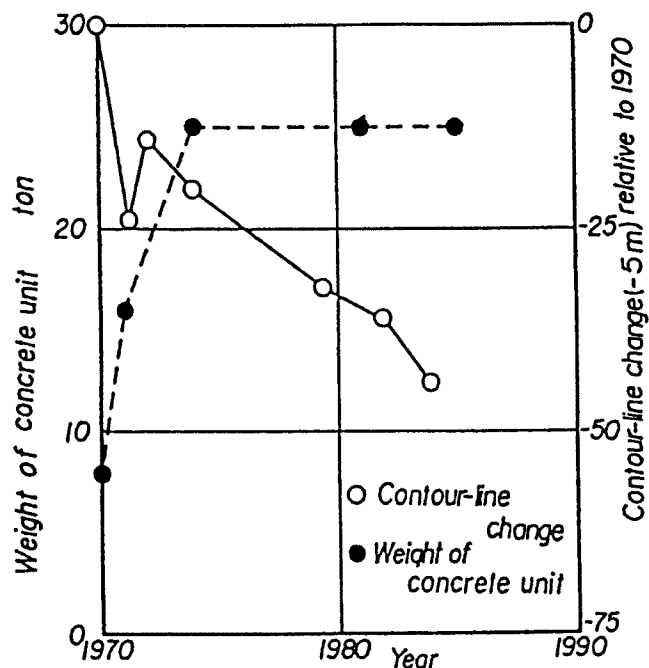


Fig. 7.5. Increase in necessary weight of concrete units with increase of water depth in front of sea dikes and walls in Itoigawa coast.

ともあれ、現行の方策による侵食対策を実施していくか、あるいはまた安定海浜工法の適用によって海岸の安定化を図るにせよ、かなり多額の経費を必要とする。しかし、後者の方法によって、安定な海浜群を形成させることができれば、そこには数百m程度の曲線状の砂浜（残念ながら20年ほど前のような直線状の

砂浜では、前述した第1および第2の原因による海岸侵食に対して、安定となるような砂浜は決して存在しない）がヘッドランド群の間にできあがることになるので、長期的な観点からその利用計画を立てなければならない。

その場合、前述したように、この海岸では WNW および N または NNE 方向からの2つの主波浪が来襲するので、当然のことながら形成される砂浜は少なくとも 20 m から 40 m、またはそれ以上、生き物のように変動する。これが自然であり、この変動する性質が自然の砂浜として存在することになるのである。したがって、形成された砂浜が自然の性として変動する範囲を行政的に確保しておくことが必要であり、その変動する範囲を利用するような計画を決して考えてはいけけないのである。そのような砂浜の変動限界から、行政的に構造物などを設置してはいけけない限界線のことを *set back line* という。海岸保全を最優先にしなければならぬわが国では、土屋²⁶⁾がすでに提唱しているように、行政的に *set back line* を設定しなければならないと思う。

つぎに、具体的にヘッドランドの構造について若干述べておく。たとえば、Hsu・Silvester²⁷⁾はヘッドランドの基本的な構造として Fig. 7.6 (a) に示すような構造のものをあげてい

る。すなわち、沿岸漂砂の主方向に沿っては、漂砂が堆積するように、そして反対向きの波浪に対して護岸できることを主目的に考えているようである。また、人工海浜設計のマニュアル²⁸⁾によれば、Fig. 7.6 (b) のようなものが示されているが、これは養浜砂の流出を防止するのが主目的となっていると思われる。このような具体例を参考にし、かつ前述したヘッドランドの基本構造などを基礎にすれば、上越、大潟海岸の場合には、次のように考えられるのではないと思われる。すなわち、前述した第1および第2区域に対して、それぞれの侵食原因とそれに対応すべき侵食制御においてヘッドランドの設置水深との関係で考察すべきであろう。

まず、第1の区域では、できれば碎波帯以深にヘッドランド先端を設置して沿岸漂砂の存在しない理想的な安定海浜を形成させるのがよいと思われる。すなわち、計画潮位 T.P. +1.15 m とし、計画波の有義波高 6.00 m および周期 11 s 程度を対象とすれば、その碎波水深 8.7 m となる。ここに前述したヘッドランド A を設置することは、確かに理想的と思われるが、そのような波の発生頻度を考慮すると、もっと発生頻度

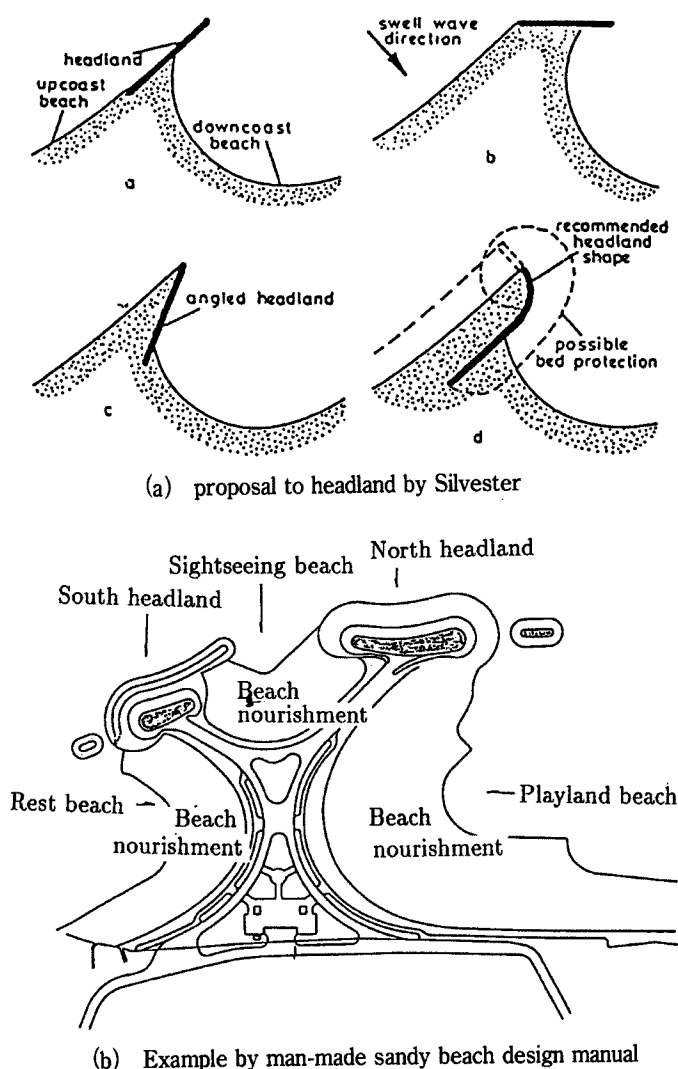


Fig. 7.6. Design of headland to be employed in formation of stable sandy beach in Joetsu-Ogata coast.

が高く、海浜変形に支配的なような波浪を対象としたほうがよいであろう。糸魚川海岸において²⁵⁾年平均の沿岸漂砂量に最も寄与する波浪をその発生頻度と波浪エネルギーフラックスとの関係で調べた結果によれば、有義波高で 2.4 m 程度であることがわかっている。地理的条件から若干の相違は当然であろうが、この検討が直江津港の長期の波浪データを用いていることを考慮すれば、上越、大潟海岸ではこの程度の代表波浪を対象とすれば実用上は十分であろう。ここでは、この波浪による沿岸漂砂の大部分は阻止できるような水深にヘッドランドを設置することで満足することにしよう。そうすれば、その碎波水深は 3.5 m 程度となるので、沿岸漂砂の沖方向分布から、その 90 % 以上が阻止されるであろう離岸距離は碎波帯幅の約 1.5 から 1.7 倍であると推定されるので、対象とすべき水深は 5.25 から 5.95 m 程度となる。したがって、水深 6 m 付近にヘッドランドの先端を設置し、その先端付近をできるだけ緩傾斜とし、波の反射率を下げるとともに、その先端をまわる沿岸漂砂量を減少できるように考えよう。

いうまでもなく、ヘッドランド B, C, D および E はそれより岸側に設置されるわけであるから、それらの先端を通過する沿岸漂砂量は存在することになろう。しかし、前述したように、この海岸では波浪の碎波角は十分小さく（ただし、N または NNE よりの寄りまわり波としてのうねりはかなり大きい、波高はたかだか 2 m であろう）なり、沿岸漂砂量も多くないので、この程度の規模でよいと思われる。

実際には、その構造物としての安定性のみならず、前述した利用面のほか施工法などとの関係も考慮しなければならないが、参考までにその基本構造を示す。この海岸には前述したように 2 つの主波浪があり、このうち WNW からの波浪は周期が比較的短く 8 から 10 sec 程度の風波で、その有義波高は計画波として採用されているものをあげれば 6 m に達する。したがって、この波浪の波形勾配はかなり大きく、侵食型の海浜断面をとりがちで、沿岸漂砂は東向きである。これに対して、N または NNW からの波浪はうねりであり、周期は 12 sec になるが、波高はたかだか 2 m 程度であろうから、その波形勾配はかなり小さく、むしろ堆積型の海浜断面をとりがちで、沿岸漂砂は西向きとなり、前者に比べて比較的浅い海域において存在することになろう。このような主波浪とそれによる沿岸漂砂の特性を考えると、ヘッドランドの基本構造は Fig. 7.6 のようになる。これらのうち (a) は離岸堤のように沖側において所定の長さの平行堤を有するもので、その長さと間隔を適当に選定すれば、養浜砂の流出を防ぐのには効果的であろう。この平行堤部分はその利用目的に応じ、また背後地の利用とも関連して設計すべきであるが、いずれにしても低反射の構造としなければならないであろう。また、その取付部は突堤状にして、漂砂の堆積性を増大させるのもよいが、一方では工事用道路を兼用し、完成後の利用面を考えて設計すべきである。このような形式のヘッドランドでは、平行堤の長さを安定海浜の形成条件を考えて決定すべきであろうが、実用上は離岸距離との関係でトンボロ地形が形成されることが最大の条件となろう。そして、これは波向が 2 方向から来襲する場合でも、養浜砂の流出防止やさらに沖側からの漂砂の堆積に対して有効であろう。したがって、Figs. 7.3 および 7.4 に示したヘッドランド A, B, C, D および E などはこの形式のものがよいかも知れない。しかし、図中にも示してあるように、前述した考えによるいわゆる set back line を定めて、砂浜の変動性を認容することが最も大切なことである。

一方、(b) の方は前述したように Hsu・Silvester²⁷⁾ によるもので、それを若干変形して説明の便を図ったものである。すなわち、WNW からの波浪による沿岸漂砂量 Q_W によって、ヘッドランドの西側（図面では左側）に漂砂が堆積するので、汀線は前進して図のようになるであろう。しかし、N または NNE からのうねりによる沿岸漂砂 Q_N によって、この堆積部分が侵食され図のように汀線は後退して砂浜は変形するであろう。それが set back line 内に入っているように計画しなければならないのである。ヘッドランドの東側（図においては右側）では、WNW からの波浪の場合、ヘッドランドによる回折波によって沿岸漂砂量 Q_W で、図中に示すように漂砂が堆積する。この波浪による堆積地形は、いわゆるトンボロ地形の 1 つであるが、そこに N または NNE からのうねりが侵入すると、それによる沿岸漂砂 Q_N によって、さらに堆積し、汀線は図のように前進するであろう。このとき、うねりの波形勾配は比較的小さいので、突堤型ヘッドランドの東端付近では越波する可能性がある。もし、越波すると、その西側の堆積による砂浜を局所的に侵食ま

たは洗掘するであろうから、越波防止のためパラベット状の遊歩道を兼ねた構造とするのが实际的であろう。いずれにしても、このような2つの主波浪が存在する海岸では、海浜地形は変動するので、その限界を見極めていわゆる set back line として余裕を残すことが肝要である。もし、この余裕がないと、異常波浪の来襲時には護岸などに波浪が衝突し、強い反射波によって砂浜が消失するであろう。

このような形式のヘッドランドは、前述した第1区域よりも、むしろ第2区域においてその適用性が高いと思われる。この場合、漂砂の堆積によるトンボロ地形の形成を期待するならば、(a) に示したような形式として、より小規模なものとし、あまり自然の強い反作用を起こさせないようにして用いるのがよいであろう。この場合、これらのヘッドランドを実際どこに設置するかについて、さらに考察しておこう。ヘッドランドの間隔は、前述したように第2区域においては、0.4、0.3および0.2 km 程度として漸次その規模を小さくするように考えてきた。しかし、実際の海底地形の測量結果をみると、沿岸砂州の形成において砂州の trough と shoal がほとんど固定していることがわかる。このことは、多分沿岸漂砂量がかなり小さいということも関係しようが、この海岸における海浜地形の大きな特徴といえる。したがって、比較的小規模のヘッドランド群を設置して安定な海浜群を形成させるためには、このような固定化している shoal の位置を利用し、その背面付近にその間隔に大体一致させて設置すればよいと思われる。ただし、ヘッドランド間に経線される砂浜は、決して直線状のものではなく、湾局した砂浜であって、そのような砂浜においてのみ安定することに留意し、たとえその一部が一時的に変動しても、それは自然の性と理解すべきである。

(4) 施工方法および順序：原則としては、この種の構造物は沿岸漂砂の下手側より順次その上手側に施工していくべきである。海岸に構造物を築造すると、多かれ少なかれ沿岸漂砂を遮断するので、漂砂の上手側には堆積し、下手側は侵食される。したがって、その構造物の影響が漂砂の下手側の海岸に順次影響を及ぼすことになる。しかし、上越、大潟海岸の場合には、直江津港の東海岸からかなりの範囲にわたってすでに著しく侵食され、かつ各種海岸構造物に対する激しい自然の反作用が現われているので、できれば、これらの地域から新しい侵食制御の方法を試みたいであろう。そのためには、ある範囲を1つの干渉地域のように考えて、そこでは設置した構造物の影響が現れてもやむを得ないことにしよう。都合のよいことに、前述したようにこの海岸では侵食原因によって2つの区域について、それぞれ侵食制御法を考えなければならない理由があるが、それ故、その境界が大体新堀川付近にあること、およびその東側に大潟漁港が築造されつつあるので、この区域をその対象に指定しよう。そして、Fig. 7.4 に示したヘッドランド D を新堀川左岸の若干西寄りの地点に設置し、これを最初に施工することにし、同時にヘッドランド C を施工して、この区間の養浜を行い、果たして安定海浜が形成される方向に海浜が変形するかどうかを調査し、その可能性を確かめる。その場合、ヘッドランド D の影響により大潟漁港までの区間では若干変形するかも知れないが、現在の防波堤それ自身が仮設のヘッドランドの役目を果たすことを期待しよう。まず、少なくとも1つの安定海浜がこのようなヘッドランド群によって形成されることが、現場で確かめられれば、あとはその施工順序を十分検討することによって、恒久的な海岸侵食制御法の1つとして、この安定海浜工法の適用性が評価されるものと思われる。

次に、養浜する場合、その養浜砂をどこから運ぶかについて考察しておこう。必要な養浜砂量とその質については、あらかじめ検討しておかなければならないが、少なくとも質については大潟海岸の侵食前における底質と同程度、または少し粗粒のものでもよいであろう。背後地の砂丘地、または海がけの一部にそれを求めることができれば、大変好都合であろうが、さもないれば海岸侵食によって岸付近の底質が沖側に移動し堆積している事実を考えて、海中における漂砂の堆積層から養浜砂を求めるのがよいであろう。その工事期間をできるだけ短縮することを考え、漁業関係者の同意を得なければならないのは当然である。

以上、具体的に上越、大潟海岸の侵食制御の方法論を述べてきたが、これらの中には、さらに調査研究しなければならない諸点が残されているが、ここで提案した考えによれば、少なくとも現在進行中の海岸侵食に対して、そこに1つの安定な海浜群を形成させることの可能性を見出すことができるであろう。海岸侵食に対して、海浜が安定化していくという期待が皆無であるような侵食対策より、原理的に安定海浜の形成が

保証されて、次第に安定化する傾向を持つもの、あるいはより積極的に安定な海浜群が形成されるものの方を長期的な海岸保全の観点から採用すべきであろう。

8. 安定海浜の形成に関する実験

比較的大規模な海岸構造物が建設された場合の海岸侵食制御の基本的な方法論については前章までで検討した結果、海浜の安定化を図るためには安定な海浜群を形成されるべきであり、いわゆる安定海浜工法の適用が最も好ましい具体的な方法であることを示し、その具体的な方法を上越、大潟海岸について述べた。それらの結論は各種の数値モデルによって検討されたが、その結果を物理モデルによって再確認することが大切であるとの認識から、ここではその一例として前述した上越、大潟海岸を対象として実施した安定海浜の形成に関する水理実験の結果について報告する。その場合、安定海浜工法のほか、比較のために離岸堤工法、人工リーフ工法を適用した場合の海浜変形の特性的についても実験的に検討する。

8.1 相似側、実験装置および実験条件

(1) 相似側

海浜変形の実験では、その相似側を適切に選定しなければならないが、いまだその定説が得られていない。ここでは、伊藤・土屋²⁹⁾ および Dean³⁰⁾ による相似則によって検討する。まず、対象とする縮尺はできるだけ大規模な安定海浜が形成されるように鉛直、水平縮尺とも 1/100 程度とし、底質としては従来砂が多用された石炭粉が用いられてきたが、多くの場合前浜から碎波点付近にかけて砂れんが発生し、これが縮尺効果を生じさせる原因の一つになっているので、本実験では、底質として軽量骨材を用いることにした。それはほぼ球状粒子で比重 $s/r = 1.80$ 、中央粒 $D_{50} = 0.085$ cm および沈降速度 $w_0 = 7.92$ cm/sec であり、0.100 cm および 0.070 cm の篩目の篩で篩分けしたものであり、ほぼ様な粒径のものといえる。

まず、伊藤・土屋²⁹⁾ の相似則は原型と模型の海浜断面の比較から、Froude の相似則を適用したとき、そこに現れる縮尺効果は底質（ここでは砂を対象とする）特性によるものとして、その関係を実験的に見いだしたものであり、Fig. 8.1 (a) に示される。ここに、 λ_d および λ_{Hc} はそれぞれ底質粒径および模型縮尺を表わし、鎖線で囲まれた領域が相似の成立する範囲 (Similitude) を示している。ただし、この表示では底質の比重の効果は導入されていないので、Shields 数の表示を参考にして水中比重 ($s/r - 1$) を考慮して補正することにする。すなわち、砂の比重を 2.65 とすれば、水中比重の比は 2.06 となるので、この相似則を適用して前述した軽量骨材を用いた場合、縮尺 1/100 に対応した実験から原型の底質粒径を求めると、0.041 cm となる。これは大潟海岸における汀線から碎波帯付近の底質粒径が 0.05 cm 程度であることを考えるとほぼ妥当であるといえる。これを Fig. 8.1 (a) に表示すると、矢印で示したように若干小さく表され前述した領域を少し外れているが、擬相似 (Quasi-similitude) の領域に入っている。

つぎに、Dean³⁰⁾ による相似則によって検討する。Fig. 8.1 (b) はその表示を示すが、ここに H_0/L_0 は沖波の波形勾配で、 w_0/gT は底質の沈降速度 w_0 、重力の加速度 g 、および波の周期 T で作られる無次元量である。Froude の相似則を適用した場合、底質はこの値が等しくなるように選定されることになる。現地における底質粒径に対応した沈降速度は 6.5 cm/sec であるので、その比は 1.22 となり、もう少し細粒の底質を用いるべきこととなる。一方、砂れんの発生限界から検討すると、底質として砂を用いる場合よりこの骨材を使用すると、ほとんど砂れんは発生しないことが土屋・坂野³¹⁾ の表示によって確かめられており、また任意の底質が使用できるわけではないので、ここではこの軽量骨材を使用することとした。

(2) 実験装置

実験は京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所の扇形平面波浪水槽で行った。この水槽は直径 35 m の半円部と 35 m × 10 m の長方形から成り立っている。この実験では規則波を用いたが、その造波機は造波板の長さが 12 m のダブルヒンジ型のものである。模型海浜を実験水槽の中に設置し、対象とする上越、大

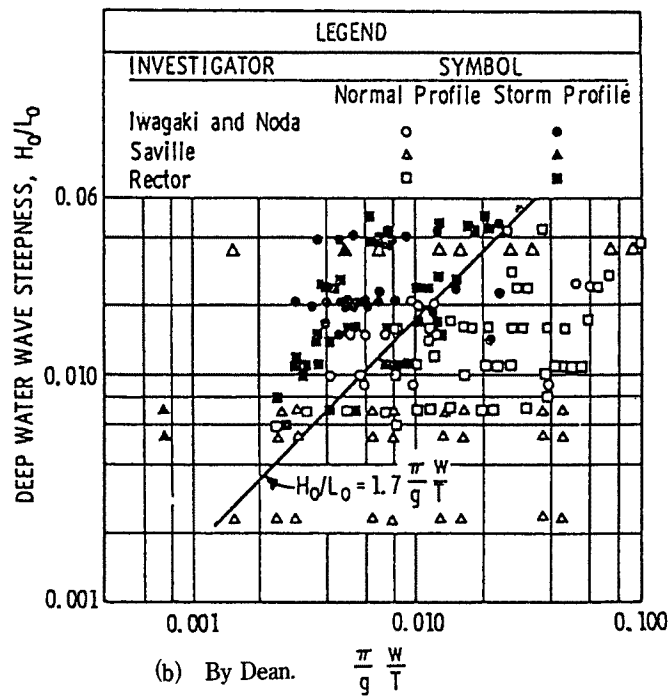
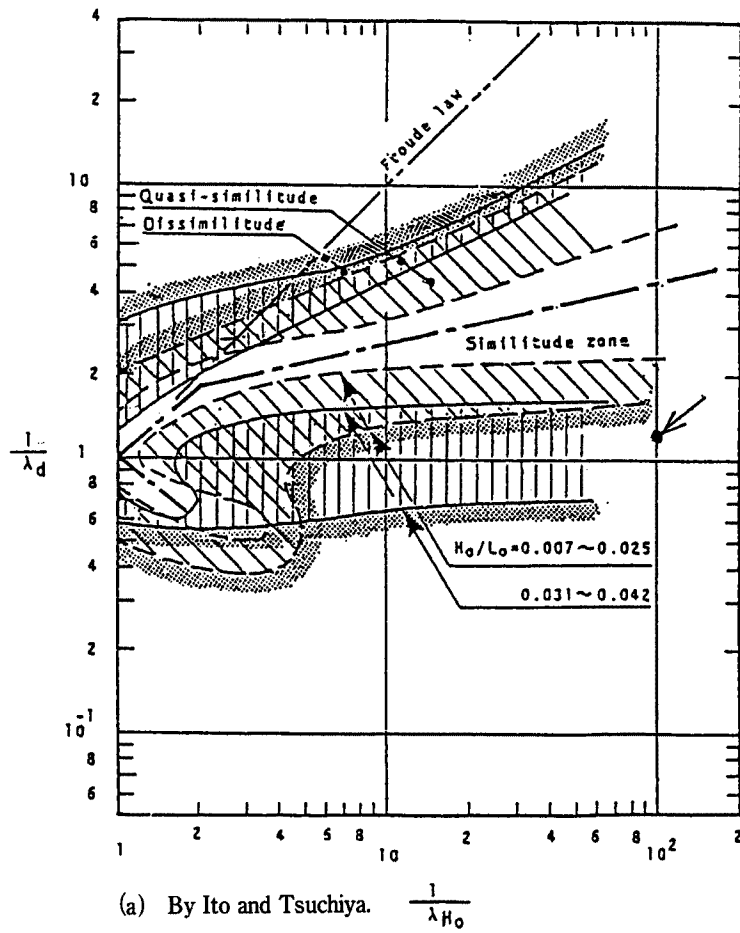


Fig. 8.1. Similitudes of beach profile change.

潟海岸が直線状の海岸であることから所定の勾配をもつ海浜としてすべて移動床とした。基本的な海浜断面は昭和43年に行った深浅測量の結果を用いて、いわゆる波浪エネルギー逸散型 (Dissipative beach) の海岸とし、また反射型 (Reflective beach) の海岸は、汀線付近にコンクリートブロックを用いて波が部分反射するようにして形成させることにした。

(3) 実験条件

海浜形状の計測は超音波式測深器を計測台車にのせて走行させて行った。その計測台車はパーソナルコンピュータで制御され、20 cm 走行ごとに1秒間静止して測深できるようにし、その記録はアナログおよびデジタル出力を併用して行った。波の計測には容量式波高計を用いた。

まず、安定海浜に関する実験における波特性は Froude の相似則から、波向 WNW の場合、波高 $H = 5.5$ cm および周期 $T = 0.80$ sec, および NNW の場合、それぞれ 4.0 cm および 1.2 sec とした。実験条件を Table. 8.1 に示す。安定海浜の形成と各種の工法による海浜変形との比較実験では、模型縮尺は Table. 8.1 に示した Run 25 までは水平、鉛直縮尺 1/100 とし、2つのヘッドランドによる安定海浜の形成実験である Run 30 および 31 及び 32 では 1/120 とした。この場合、海浜模型は沿岸方向に造波板の長さに等しく 12 m 造成したが、計画台の長さが 8 m であることから、海浜中央部に離岸堤、人工リーフおよびヘッドランドをそれぞれ設置した。したがって、これらの構造物周辺の海浜変形に及ぼす側壁 (導波板) の影響を少なくすることができることが写真撮影などによって確認された。実験波の条件は模型縮尺が 1/100 の場合、

Table 8.1. Experimental condition in formation of sandy beaches by offshore breakwaters and headlands

Run No.	Wave direction	Measuring hours (hr)	Purpose of experiment
1	NW	0, 1, 3, 10	Problems of offshore breakwater and artificial reef
2	WNW	0, 1, ~4, 10	Applicability of the above works with arbitrary wave angle
3	NW	0, 1, 6	Wave reflective beach (offshore breakwater on the Ogata coast)
4	NW	0, 1, 6	Beach changes with mild sloped offshore breakwater
5	NW	0, 1, 4	Applicability of headland defense control works (without beach nourishment)
6	NW	0, 1, 2	Beach nourishment (23000 m ³)
7	NW	0, 1, 2	Beach nourishment (11500 m ³)
8	NW	0, 1, 2	Beach nourishment (5000 m ³)
9	NW	0, 2, 14	Removal of concrete block with beach nourishment
21	NW	0, 20, 40	Formation of stable beach
22	NW	0, 3, 5, 7, 9	Formation of tombolo (length of headland l : 90 m, distance between shoreline and headland x : 150 m)
23	NW	0, 3, 5, 7, 9	Formation of tombolo $l=120$ m, $x=150$ m
24	NW	0, 3, 5, 7, 10, 5	Formation of tombolo $l=60$ m, $x=150$ m
25	NW	0, 3, 5, 6, 9	Formation of tombolo $l=60$ m, $x=100$ m
30	NW	0, 3, 5, 7, 9	Formation of stable beach on wave reflective beach
31	NW	0, 12, 36	Formation of stable beach on dissipative beach
32	NW6, 6°W NW10°E	10	Confirmation of stability

波高 $H = 5.5 \text{ cm}$ および周期 $T = 0.8 \text{ sec}$ で、波向きは NW (汀線直角方向) と WNW, 沖合いの水深は 30 cm とした。また、縮尺 $1/120$ の場合には、 $H = 4.6 \text{ cm}$ および $T = 0.73 \text{ sec}$ で波向きは NW とそれより 6.6° W 及び $H = 4.6 \text{ cm}$, $T = 0.92 \text{ sec}$ で波向きが NW 10° E の 3 種類とした。これらの実験条件を一括して Table. 8.1 に示してある。

8.2 安定海浜の形成に関する実験

上越、大潟海岸に安定海浜工法を実験的に適用するに当たり、まず模型海浜がこの海浜変形の基本的特性を再現しているかどうかを確認する必要がある。しかしながら、季節風による波浪を再現することはほとんど不可能であるので、ここでは離岸堤、人工リーフおよびヘッドランドの築造後に、果たして海浜の安定化が期待されるような汀線変化が見られるかどうかを確認することができればよいと考えた。すなわち、いわゆるエネルギー逸散型または反射型の模型海浜を形成させることができるかどうか、またそれが現地海浜特性を模擬できているかを調べることにした。

1) 離岸堤および人工リーフ工法による海浜変形

(1) 直角入射波 (NW) の場合：海浜地形は波浪エネルギー逸散型海浜 (関川からの漂砂源が存在した当時の海浜で、当時の海浜断面を参照し、水深 10 cm までは $1/23.5$, それより沖側は $1/33.3$ の勾配に設定した) とし、これに NW 方向の実験波を 3 時間作用させて形成された海浜を初期海浜としたが、沿岸方向の一樣性がほぼ確保されたことが確認された。離岸堤の諸元は、大潟海岸における施工実績を参照して、模型実験において長さ 130 m , 幅 10 cm (水面幅), 離岸距離 1 m とし、沖側の勾配は 1 割強とし、それ以外の周辺はブロック積みとした。一方、人工リーフは糸魚川海岸に施工中のものを参照して、本実験では幅 40 cm , 天端水深 4 cm , 沖側勾配約 3 割, 岸側勾配約 2 割とし沿岸方向の端部はほぼ直立させたものとし、その堤体はビニール金網 (約 1 cm メッシュ) で直方体状のものを作り、これに砂利 (平均粒径が約 1 cm より小さいもの) を詰めて製作した。その離岸距離は 1.3 m とし、沿岸方向の長さは実験上の制約もあって 3 m とした。

まず、逸散型海浜に実験波が来襲した場合、人工リーフの背後では汀線後退、構造物のない海岸では汀線前進、離岸堤の背後ではトンボロが形成され、やはり汀線が前進することがわかり、また人工リーフの岸側の海浜に 3 つの深みが形成され、その天端も沿岸方向にかなり不等沈下することが見いだされたが、その流況を観察したところ、人工リーフの背後には 3 つの渦が形成され、かつ中央寄りの端部では強い離岸流が発生して海底地形が変化したことがわかった。さらに、人工リーフ中央部付近でも離岸流が発生し、沖方向への漂砂の移動が認められた。Fig. 8.2 (a) および (b) には初期海浜と 10 時間後の海底地形変化の沿岸方向分布を示す。(a) において $y = 4.1 \text{ m}$ は人工リーフの沖側に設定した測線であるが、ここでは、ほぼ全面的に侵食されて深くなっていることがわかり、また (b) において $y = 3.4 \text{ m}$ は離岸堤の沖側の測線であるが、観察によれば離岸堤両端付近の漂砂がその背後に運ばれてトンボロになり離岸堤の沖側の勾配を緩くしてその前面はあまり侵食されていない

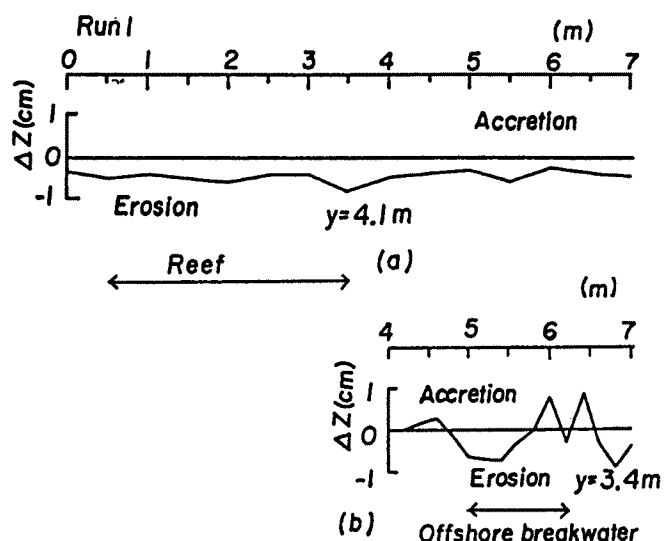


Fig. 8.2. Initial beach profile formed by NW waves and its longshore distribution.

いことも見いだされる。なお、この実験では水深が15 cm以上の海域では海底地形はほとんど変化しなかった。

(2) 斜め入射波 (NNW) の場合：斜め入射波の場合には一般に沿岸漂砂が存在するため給砂条件が重要であり、漂砂の連続性を確保するように努めて、斜め入射波の場合どのようなことが起こるのかを明らかにすることにしたので、上手側からの直接給砂は行っていない。

Fig. 8.2 に WNW の波を10時間作用させたあとの汀線も示したが、観察によると離岸堤背後のトンボロがそれほど変化していないのに対して、人工リーフの背後で深みができており、この海域の漂砂が沿岸流で下手側に運ばれて汀線の後退が著しくなることが認められた。

Fig. 8.3 (a) および (b) は Fig. 8.2 と同じく、Run 2 の実験の初期および最終海底地形の変化を示したものであるが、斜め入射波のために東側（向かって右側）に向かう沿岸漂砂が発生し、離岸堤の沖側 ($y = 3.4$ m) で顕著な堆積が見られ、それより沖側では全般に侵食されていることがわかる。

これらの結果から、次のことが指摘できる。すなわち、斜め入射波の場合、人工リーフ上で波浪が強制碎波されるため、その背後（岸側）で強い沿岸流が発生し、その流速が設置前に比べて大きくなるので沿岸漂

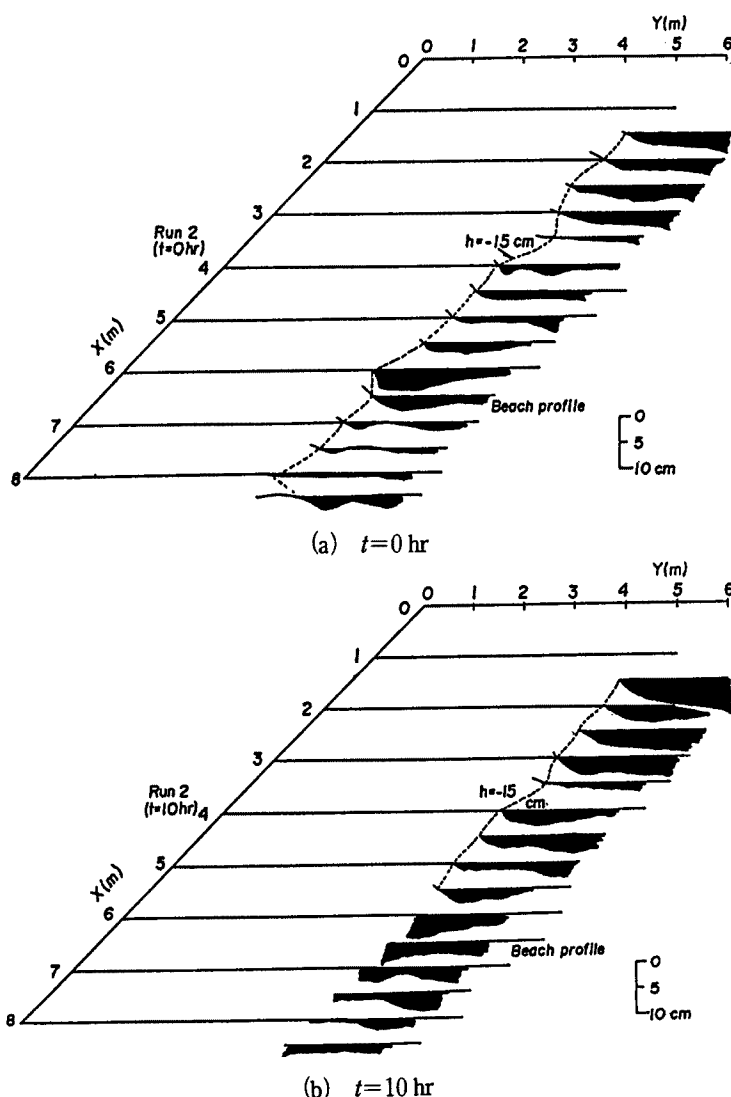


Fig. 8.3. Initial beach profile formed by NNW waves and its longshore distribution.

砂量も増大するので、人工リーフ背後では侵食されることになる。

2) 反射型海浜に設置した離岸堤による海浜変形

(1) 不透過、直立離岸堤を設置した場合：反射型の海浜を作るために、水深 8 cm までは勾配 1/10 それより沖では 1/100 として実験波を 2 時間作用させて形成させ、汀線より 43 cm 沖にコンクリートブロックを沿岸方向に一列に設置し、かつ岸側に若干天端を傾斜させて、この前面で部分反射波となるようにした。これは現在の大湊海岸では前浜上に護岸、海岸堤防があり、その前面には消波ブロックが置かれ、高波浪がこれに直接来襲して、顕著な反射波が発生していることに対応している。離岸堤（長さ 1.2 m、幅 10 cm、離岸距離 1 m）2 基は 4 m 離して設置し、周囲には消波ブロックは置いていない。こうした実験から、反射型海浜でかつ汀線近傍で波が強制的に部分反射する場合には、離岸堤背後に顕著なトンボロは発生しないことがわかった。これは反射波の存在

によって回折波が形成されにくく、また反射波による沖方向漂砂の発生が原因するためと思われる。Fig. 8.4 (a) および (b) には岸沖方向および沿岸方向に設置した測線での海底地形の変化を示す。まず、(a) から離岸堤のない断面では、コンクリートブロックの少し沖側には漂砂の顕著な堆積があり、さらに沖側では、反射による部分重複波のために海底に侵食と堆積域が交互に現われている。しかし、離岸堤の沖側ではやはり反射波の影響が沖方向に遠くまで現れており、この方向への漂砂の流出に結びつく危険性を示すことがわかる。また、(b) からはこれまでに指摘したトンボロの形成が難しいこと、離岸堤の岸側に漂砂が堆積しているところでは沖側で侵食され（この場合、沖からの漂砂が離岸堤を回り込んで堆積する）、その逆の場合も観察されることなどが明らかにされた。

(2) 緩傾斜の離岸堤の場合：前述したように、反射率の大きい離岸堤を設置した場合には、トンボロの形成が期待できず、しかも離岸堤周辺はもとよりその沖側の海底地形が大きく変形することが見いだされた。そこで、とくに、離岸堤の沖側を緩傾斜とし、基本的にヘッドランドが具備すべき緩傾斜、低反射という特性をもつ構造物を設置して、これによる海浜変形を検討したが、構造物の背後では回折波と反射波が複雑に重なっており、トンボロの形成はあまり期待できないが、背後では漂砂の堆積が見られ、か

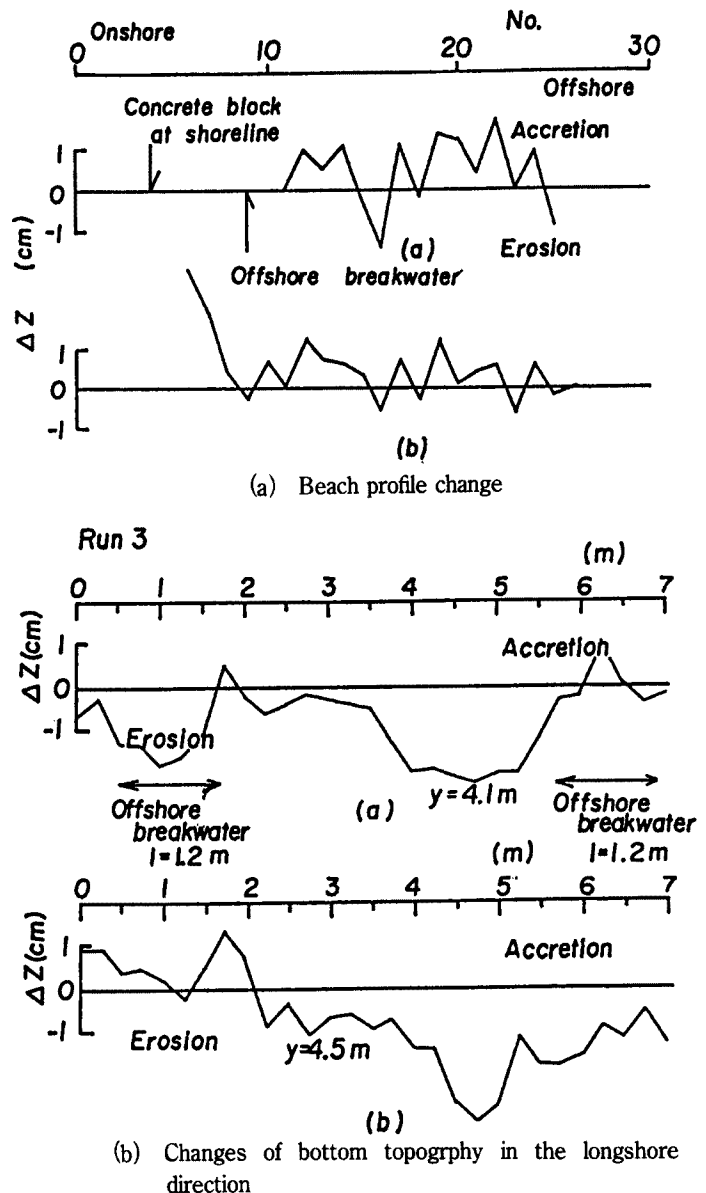


Fig. 8.4. Shoreline configuration in formation of sandy stable beach by a couple of headlands.

つ沿岸方向に舌状砂州が形成されたときのような海底地形が形成されている。このように、構造物の反射率を小さくすれば、汀線付近に漂砂の堆積が期待でき、また沖方向への漂砂の流失も軽減することができると考えられる。

3) ヘッドランドの設置による海浜変形

ここでは、前述した反射型海浜にヘッドランドを設置した場合の海浜変形の特性と、養浜によって最終的に安定海浜が形成されるかどうかを実験的に検討する。

(1) ヘッドランドの構造と配置：ヘッドランドは構造物に対する自然からの反作用を極力小さくするため、緩傾斜として低反射構造を基本とする。そこで、まず堤体を作るためにナイロン製ネットの袋に大小2種類の砂利を詰めたものを基本ユニットとして用いて、これらを平均海面下の堤体材料として使用した。つぎに、このマウンド上に載荷する構造物として直径 10 cm の金網製チューブに砂利を詰め、かつ岸側に曲げて弧状とし、沿岸方向の長さを 80 cm としたものを製作した。この構造の意図するところは、弧状の構造物とすることによって、入射波の反射方向を拡大し、より低反射の特性をもたすためである。これらのヘッドランドを2基製作して沿岸方向に 5.2 m 離して設置した。

(2) ヘッドランド周辺の波の来襲状況と海浜変形観察によると、ヘッドランド背後に護岸による若干の反射波がみられるが、きれいな回折波が形成され、沖側への反射波はほとんど認められない。低反射のヘッドランドを設置すると、汀線付近に漂砂が堆積しやすくなることが確認された。とくに、東側（下手側）のヘッドランド背後には明らかに舌状砂州、またはトンボロが形成されているが、波が来襲しているときは大部分が水没しており、ごくわずかの漂砂が堆積していくのが観察された。また反対側のヘッドランドの背後では、このような過程がなお進行中であり、東西両側から回り込んで来た漂砂による堆積地形のフロントが観察された。反射率を小さくすれば、沖からの向岸漂砂が期待できることがわかる。ただし、ヘッドランドの背後以外の区域では、波はコンクリートブロックに直接うち上がるので、それほど多くの向岸漂砂は期待できない。そこで、若干の養浜によって、ヘッドランドの背後を通過する流れを止めて、かつ汀線付近に設置したコンクリートブロックを撤去して実験を 14 時間継続すると、汀線付近に漂砂が堆積し、安定した海浜が形成されることが認められる。

(3) 2つのヘッドランドによる安定海浜の形成：一対のヘッドランドによる安定海浜の形成過程を究明し、必要最小限度の養浜砂量を検討するために実験した。Fig. 8.5 は間隔を 7 m（現地換算で約 700 m）とした一対のヘッドランドによる安定海浜の形成過程を示す。これは斜め入射波の場合でもあるので、沿岸漂砂量の存在を許したが、明らかに各ヘッドランド背面にそれぞれトンボロ地形が形成されるが、それらが協

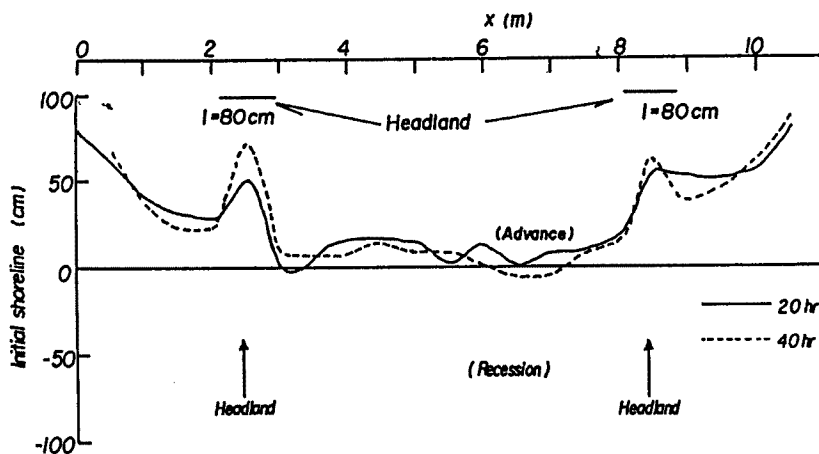


Fig. 8.5. Shoreline change by a couple of headlands as accretion and retreat of shoreline.

同し、融合したときに一つの砂浜として安定海浜が形成されることが確認できる。言い換えれば、このような安定海浜の形成においては、一対のヘッドランドによって形成される相互のトンボロ地形の干渉効果が必要かつ十分であることが条件となろう。極端に両者の干渉効果にだけ期待して、それによる堆砂の結果を強調してきたのが離岸堤工法であったといえる。すなわち、相互の間隔を大きくすれば、個々のトンボロの形成により、汀線形状は必ずしも1つの弧状には結合しないであろうし、また反対に小さくし過ぎると離岸堤工法のように、その開口部の局所的な海浜変形を生ずることになろう。そこに、安定海浜が一対のヘッドランドの離岸距離と間隔との比を主成因条件とし、そのほか波浪や底質特性が加わって存在するのであろう。極端に両者の干渉効果にだけ期待して、それによる堆砂の結果を強調してきたのが離岸堤工法であったといえる。

つぎに、前述したように人為的に波浪エネルギー消散型から反射型に変わっている大湊海岸の場合では、現在護岸、海岸堤防の前面水深は6m以上にも及び、著しい反射波の発生を余儀なくしている。これによってその付近の岸側の漂砂は沖側へ移動し、海底地形を変え、より反射型の海浜になりつつあるのである。ここに、安定海浜を形成させるためには、前述した実験のように養浜を必要とするが、一体どの程度の養浜によってヘッドランド背後に舌状砂州が形成され、その付近の砂浜の反射率が減少してきて沖側の堆積漂砂がどの程度岸側に移動するかということを確認しなければならない。前述した実験で、ヘッドランド間に砂浜が形成されると、ただちに沖側の堆積漂砂が戻ってくることがすでに確かめられているが、果たしてこのために最小限どれだけの養浜を必要とするのかを見いださなければならない。

そこで、養浜しない場合、ヘッドランド背後にできるトンボロの最大湾入部が初期汀線とどのような関係になるかを見いだすための実験をRun 21で行った。まず、水深10m以深では海底勾配1/100、それより岸側では1/30の消散型海浜を造成し、3時間造波後、汀線を直線状にして初期海浜を作った。そこに長さ80cm、離岸距離1mで間隔6mの一対のヘッドランドを設置し、40時間造波した。そのときの汀線の前進、後退量をFig. 8.5に示す。これから、初期海浜が消散型の場合、養浜しなくても極端に汀線が後退する部分は現れないが、局所的に若干汀線が後退するところがあり、やはり養浜の必要性が認められる。ただし、漂砂がヘッドランド背後を両側壁に向かって移動するために、トンボロが非対称形になっているので、この影響を無視することはできない。この結果は、安定海浜の形成に寄与するヘッドランド背後のトンボロを効率的に対称的に形成させるためには、その背後における漂砂の移動を阻止する突堤が必要であることを示唆しているといえる。ともあれ、トンボロの形成によって安定海浜が得られるとしても、その汀線が現汀線よりも若干後退することは行政上、問題となるであろうから、それを避けることができるかどうかについてさらに次節でそれを検討する。

（4）ヘッドランドの配置とトンボロの特性：ここでは、緩勾配のヘッドランドの長さや離岸距離を変化させ、徐々に養浜砂量を増加させてトンボロ形成時の最大湾入位置と初期汀線位置とが一致するのに要する最小養浜砂量を見いだすための実験結果について考察する。まず、Run 22、23および24は離岸距離を150mと一定にし、ヘッドランドの長さを90、120および60mとした場合に対応している。まず、Run 22では最終的に11,000m³を養浜したところ、舌状砂州の最大湾入部がFig. 8.6(a)に示すように、初期汀線の位置まで前進することが認められた。このあとさらに養浜すると、トンボロが形成され、汀線は初期汀線位置よりもさらに前進することが確認できた。Run 23の場合には、Run 22に比べてヘッドランドが30m長くなったために、Fig. 8.6に示した11時間後にその背後に形成された舌状砂州は沿岸方向にかなり拡大したが、その最小必要養浜砂量は1100m³となっており、ヘッドランドの長さによる最小必要養浜砂量には差は認められない。つぎに、ヘッドランドを60mとしたRun 24の汀線変化の結果をFig. 8.6(b)に示す。これから25000m³を養浜し、10.5時間造波させたところ、沿岸方向にかなり非対称な舌状砂州が形成され、かつ汀線の位置が初期汀線の位置までほぼ回復することが認められたが、ヘッドランド背後で回折波が交差して、しゃ閉域が狭いために沿岸漂砂が存在して砂州の発達是非常に遅いことがわかったが、これは明らかにヘッドランド長の不足を示唆している。つぎに、ヘッドランドの長さを60m、離岸距離を100m

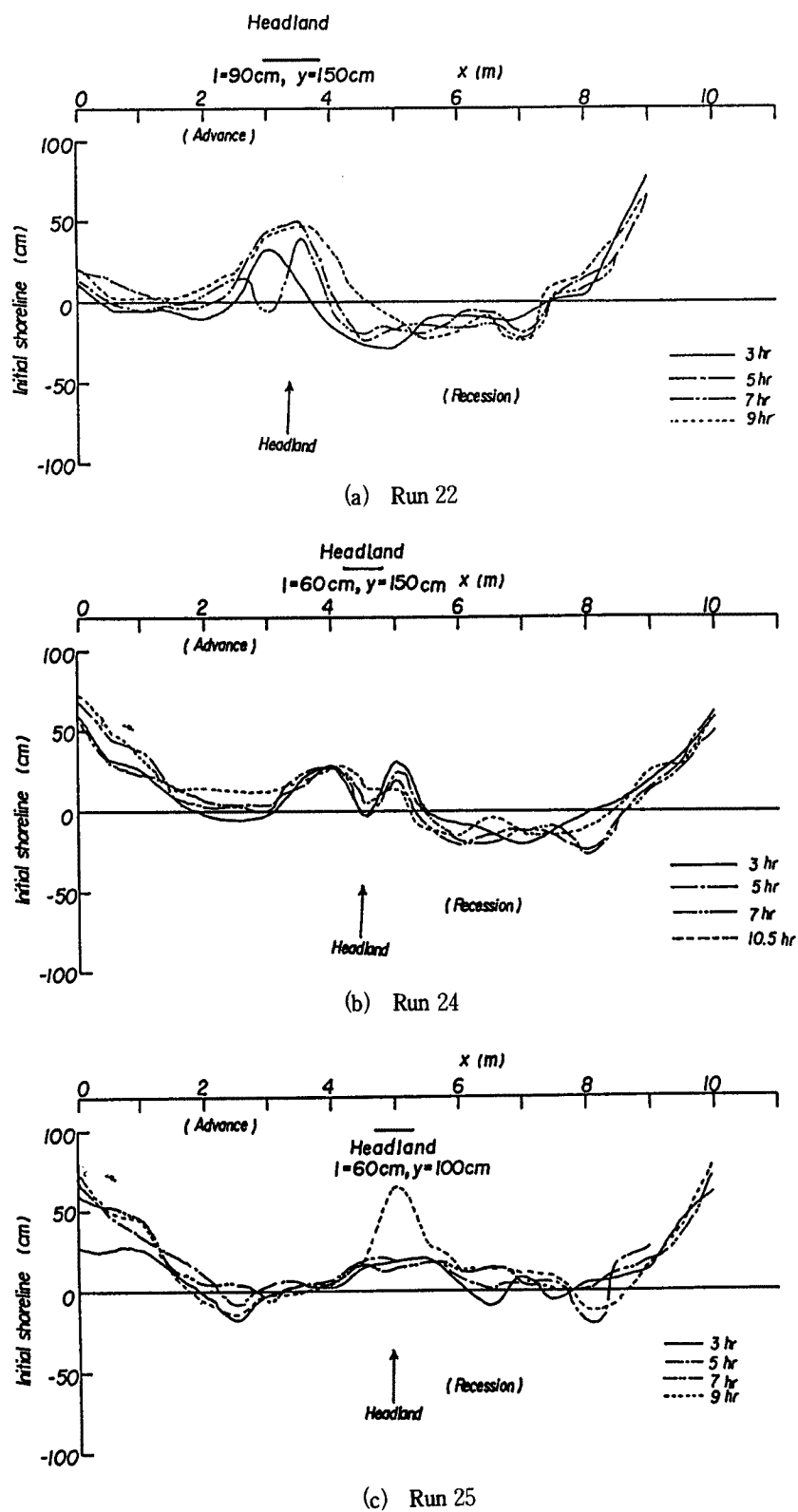


Fig. 8.6. Shoreline changes

として同様の実験を行った Run 25 の結果を Fig. 8.6 (c) に示す。これから、15000 m³ を養浜し、9 時間造波すると初期汀線の位置まで前進することが見いだされた。これと Run 24 の結果を比較すれば、離岸距離が短くなれば所要の養浜砂量が少なくなることがわかる。ただし、写真や汀線の時間的変化を表す図から理解されるように、舌状砂州あるいはトンボロの沿岸方向のスケールはヘッドランドの長さや離岸距離が短くなるほど小さくなっているため、一対のヘッドランドによって安定海浜を形成させるためにはその間隔と離岸距離やヘッドランドの長さとの一般的な関係を見いだす必要がある。

そこで、本実験結果と湘南海岸のヘッドランドの模型実験結果³²⁾ からヘッドランドの長さ l と離岸距離 y との比 l/y と無次元最小養浜砂量 v/sh （ただし、 v は養浜砂量、 s はヘッドランドによってしゃ閉される水域面積および h はヘッドランドの設置水深である）との関係を求めたものが Fig. 8.7 である。大湊海岸の実験では 2 時間毎に 2000 m³ ずつ養浜して最小養浜量を求めたのに対し、湘南海岸の実験では 1 - 2 回の養浜でこれを求めているので、少し多めに養浜している可能性があると考えられる。いずれにしても、図中に実線で示した関係を用いれば、ヘッドランドの規模を決めれば、最小養浜砂量の目安を推定できるであろう。

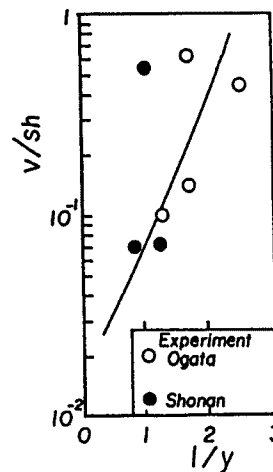


Fig. 8.7. Empirical relation between dimensionless necessary sand volume of beach nourishment and headland length relative to offshore distance between headland and shoreline.

4) 各種侵食制御工法に関する考察と安定海浜工法の適用性

ここでは、安定海浜工法とわが国でこれまで多用されてきた離岸堤工法及び最近いくつかの海岸で施工されている人工リーフ工法の 3 つの工法について考察し、長期的な海浜の安定化のための工法の選択について見解を述べる。

(1) 各種工法の一般的特性と安定海浜の可能性 1) 離岸堤工法 これはわが国の多くの海岸で施工され、多大の成果を上げてきたことは周知のとおりである。しかし、海岸によっては、離岸堤による前面および周辺の海底地形の変化が著しく、長期の海岸保全に対して不安を抱く場合も少なくない。またこの方法によって海浜の安定化が図られること、いいかえれば安定海浜が形成されるという根拠は存在しない。たとえば、沿岸漂砂が卓越する海岸では、離岸堤の下手側が必ず侵食されることはよく知られている事実であり、離岸堤の設置に対する自然からの反作用に対してつねに競合しなければならないことになる。また、一般に、離岸堤によって反射波が発生し、これによりその前面の海底地形が大きく変わり、とくに沿岸砂州の発達する海岸ではこれが消失して異常波浪時の波浪の減殺効果が期待できなくなり、長期的な海岸保全上、新たな問題点となりつつある。(2) 人工リーフ工法 これは最近、いくつかの海岸で施工が始まったばかりであり、問題点についての現場からの報告は少ないが、次の諸点が問題点として挙げられる。a) この工法は本来自然のリーフ海岸を模擬して考えられた工法であり、その着想は素晴らしいが、多くの場合そのリーフ断面における消波機能にのみ着眼している。したがって、人工リーフ上で強制碎波による質量輸送を通じて生ずる過剰流量が沿岸方向のどこかで沖側に戻ることになるので、局所的な海浜変形または洗掘の発生が懸念される。b) 自然のリーフ海岸のように、そこに形成される平面地形との関係を十分考慮して本工法を適用しない限り、長期の海浜の安定化を図るためには適用できない。これを設置すると、その前面の海底地形の変化など自然からの反作用を余儀なくされる場合が少なくないであろう。つぎに、3) 安定海浜工法 これは自然の安定砂浜海浜の形成を模擬したもので、シンガポール東海岸に最初に施工されて以来、わが国では条件こそ異なるが、和歌山県の白良浜の復元に適用され、土屋³³⁾、加藤³⁴⁾ および土屋・河田・山下・

川崎・羽原³⁵⁾が報告しているように、現在模型実験や数値計算で予測された方向に安定な海浜が形成されつつある。この工法では、前述したように、静的または動的に安定（平衡）な砂浜海浜を形成させることが原理的に可能であり、それは理論的にも実験的にも確かめられている。ただし、施工例が少なく、工法的に検討すべきことが残されている。

（2）上越、大潟海岸の侵食制御工法 前述した3つの工法に対して、この海岸の侵食原因と侵食経過からその選択について考察する。すでに、この海岸には、1) 直江津港の堤防による漂砂の阻止、2) 防波堤による波浪特性の変化、および3) 海岸侵食の進行に伴う海岸堤防あるいは離岸堤による反射波の発生による沖方向漂砂の助長の3つの侵食原因が存在する。このため、従来沿岸砂州のある波浪エネルギー消散型（dissipative beach）であった海浜が、現在ステップ状の波浪エネルギー反射型（reflective beach）に変わっている。すなわち、直江津港の西防波堤の築造前には関川からの漂砂源も期待でき、前述したようにこの海浜は波浪エネルギー消散型であった。なお、この海岸は直線海岸であり、日本海を東進する低気圧に伴って波向きが経時的に西から東方向に変化するが、高波浪はほぼ汀線と直角方向のNWのものが多く、沿岸漂砂量はそれほど多くないと言える。直江津港西防波堤が約2km以上延長され、先端水深が20m近くになって以来、沿岸漂砂の供給はほとんど皆無となった。このような自然環境の変化に対するため、大潟海岸では汀線の後退が直江津港から東進していることは周知の事実である。しかも、消波ブロックが沿岸方向に連続して設置されているため、来襲する高波浪は顕著な反射波を生じ、それは離岸漂砂を助長し、汀線の後退が加速されるという悪循環のもとに置かれてきている。

前述した砂浜の基本特性は、そこに存在する底質と来襲する波浪によって定められているもので、人為的にこれを変えることは不可能である。たとえ、ある期間に限り構造物などによってその特性を変えたとしても、前述したような自然の反作用によって破壊され、元の姿に帰ろうとするその行為を経験させられるだけである。海岸侵食を制御しようとする場合には、この事実を肝に命じて、決して自然の性格に逆らってはいけないのである。いいかえれば、波浪エネルギー消散型の海浜は、人為的に反射型の安定した海浜にすることは原理的に不可能であり、もし人為的に反射型の海浜にしつつあるようであれば、直ちにこれを消散型の海浜に近づける対策をとらなければならないのである。これが砂浜を海岸侵食から守り、それを安定化する基本理念である。このような現状では、漂砂源からの漂砂の供給が皆無でも長期的に安定な海浜に保てる侵食制御工法が必須であり、それに最も忠実な具体的な侵食制御方の1つが安定海浜工法なのである。

以上の点から、離岸堤工法と人工リーフ工法および安定海浜工法のいずれが最適かをさらに検討する。1) 前述した実験結果からもわかるように、離岸堤工法は安定海浜工法に比べて反射率が大きいために離岸漂砂すなわち沖方向に向かう漂砂を助長し、短期的には護岸に役立つが、長期的には浜砂を沖側へ流出させることになる。また、沿岸漂砂の捕捉率が極めて高いために、その下手側の海岸に及ぼす影響が大きく、一般に新たな侵食が発生する。この場合には漂砂源がなくなったと言っても、大規模海浜過程で明らかにしたように、直江津港から数キロ東では沿岸漂砂が存在しているはずであり、ここに離岸堤を施工すれば下手側海岸の決壊は必須となろう。事実、離岸堤が設置された鶴の浜では沿岸漂砂は少ないがその東海岸に顕著な後退が現れていることは、このことを裏付けている。さらに直江津港に近い海岸では、すでに多数の離岸堤が設置されているが、海底は次第に深くなり、海底地形はより波浪エネルギー反射型の海浜となって、これが安定化する傾向は全く存在しない。これらのことから、離岸堤工法ではこの海岸の安定化を図ることは不可能である。2) 人工リーフ工法の実績がいまだ明らかではないので、前述した実験結果を中心として判断することにしよう。まず、直角入射波の場合には、やはりリーフ沖側端部の比較的大きな反射率による離岸漂砂の発生と局所的な沖側への漂砂の流出の危険性が大きい。また、実験で明らかになったように、離岸堤と同じく、漂砂の流出に伴って堤体の不等沈下が発生するので、継続的な維持が必要となる。また、斜め入射波の場合には沿岸流の流速が増加して、前浜付近の侵食が助長される恐れがある。しかも、人工リーフの開口部では強い戻り流れの発生があり、これによる沖側への漂砂の流出が発生する。これらのことを考えてみると、リーフ工法はとくに波浪の集中する箇所が存在する場合に限り、その護岸のために安定海浜工法と併用

することが考えられるが、それ自身で砂浜の安定化が図れるという理屈は存在しないし、その可能性は少ない。3) 安定海浜工法を大潟海岸に適用した場合には、原理的には安定海浜を形成させることができるが、実際に適用する場合になお解決すべき幾つかの問題がある。その1つはヘッドランドの設置水深に関することであり、碎波帯を十分越えて設置するならば静的に安定な海浜を形成することができるが、この場合には背後地の利用との関係で検討されるであろう。海岸保全を目的とする限り実際には、主要波浪の碎波帯内に作られなければならないであろうから、若干の沿岸漂砂の存在とそれに対する漂砂の連続性の確保が問題となる。すなわち、この海岸の侵食原因においても述べたように、現在でも若干の沿岸漂砂量が存在するので、サンドバイパスすることにより、その条件でいかに安定海浜を形成させるかということになる。つまり、ほとんど静的に安定な海浜を前述した方法によって形成させることにすれば、すでに波浪エネルギー消散型から反射型海浜になってくれば、沖側に堆積している漂砂が次第に戻ってくることが確かめられているので、沿岸漂砂のサンドバイパスは最小限でよいものと思われる。その2つは前述したように最小養浜砂量がどの程度で安定海浜が実際に形成されるかということである。この点に関してはさらに検討するが、結論から言えば、最小養浜砂量は、ヘッドランドの背後に新しい新たにトンボロを人為的に形成させるほど必要ではないことが見いだされている。そして、ヘッドランド間に砂浜が形成されて、波浪の反射率が減少すると沖に堆積している漂砂が戻ってきてさらに砂浜を形成する。したがって、これらの諸点から判断すれば、本工法によって安定海浜を形成させることは十分可能であり、長期的に海浜の安定化を図ることができるであろう。

5) 安定海浜工法の適用性

ここでは、大潟海岸の侵食制御工法として安定海浜工法を適用する場合、ヘッドランドの規模や施工順序および安定海浜の形成過程について実験的に検討して、この工法の適用性を検討する。

(1) ヘッドランドの規模 ヘッドランドの規模の決定に際し、これを含む背後地の利用計画の関係が重要であることは言うまでもないが、海岸保全を主体とする限りでは、経費の観点からは可能な限り小規模であることが望ましい。ここでは水理実験結果からこの点について検討する。いま、Fig. 7.4 に示した安定海浜工法の適用例から、この工法が最初に新堀川河口を含む海岸に適用されるとすれば、ヘッドランドの間隔は600 m、離岸距離は約150 mである。つぎに、ヘッドランドの長さとして前述した実験結果を参考にして100 mとした。これらの諸元を用いて、Fig. 8.6 から最少養浜砂量を求めると、約5000 m³となるが、これも実験によって確かめる必要があるので、後述する。

(2) ヘッドランド築造と施工順序 ここでは、ヘッドランドを所定の海域に設置する場合の工事の順序について述べる。Run 30 では最初、消散型の海浜を作り、実験波を3時間造波させて初期海浜を造成した。そして、現状でこの海岸の反射特性を再現させるために、汀線より10 m 沖にコンクリートブロックを沿岸方向に連続して傾けて設置し、ある程度反射波が発生するようにした。このような条件で実験すると、ヘッドランド背後に舌状砂州が認められるが、その規模は非常に小さく、それはヘッドランドの背後で沿岸方向に向かう流れとそれに伴う漂砂が存在していることが認められたので、その流れを阻止するように養浜を行う前に海岸陸上部とヘッドランド間に突堤状の構造物を築造する必要がある。ただし、これによって回折波が顕著に反射すればその付近の新たな海岸侵食を助長するので、低天端で緩傾斜のものが適当であろう。

(3) 安定海浜の形成と変形過程 ここでは、初期海浜として反射型海浜 (Run 30) および消散型海浜 (Run 31) とした場合の安定海浜の形成過程を消散型海浜で季節風波浪を想定して、風波 (波向が NW) からうねり (6.6° W および 10° E) に変化した場合の変形過程を実験的に考察する。まず、初期海浜が反射型海浜の場合には、消散型海浜 (水深 6 m までは海浜勾配が $1 = 30$ でそれより以深は $1/100$) を造成し、実験波を3時間作用させた後、汀線より10 cm 沖に約45°に傾斜させたコンクリートブロックを連続して並べ、部分的反射波が発生するようにして、2基のヘッドランド (長さ100 m で離岸距離150 m) を600 m 離して設置して実験した。このときの汀線の変化を示したものが Fig. 8.8 であるが、時間の経過とともに突堤基部付近への養浜砂量を増やし、7時間造波した段階で西側のヘッドランドの突堤の右側に7500 m³の養浜砂

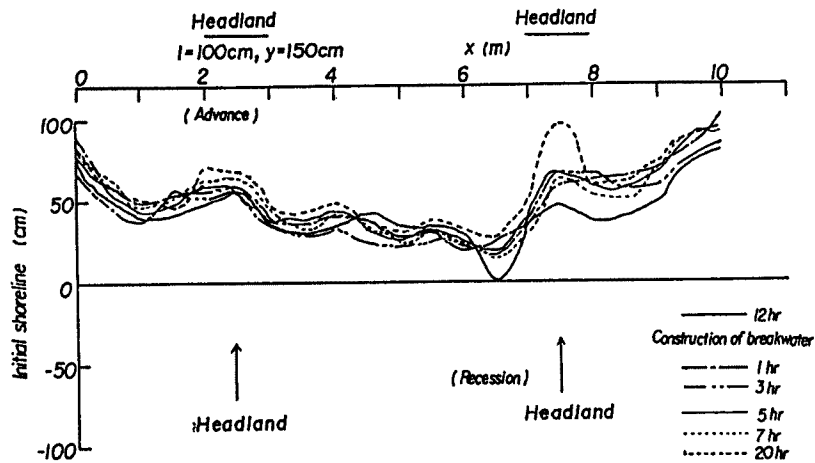


Fig. 8.8. Shoreline change and formation of stable sandy beach by headlands in case of initially reflective beach.

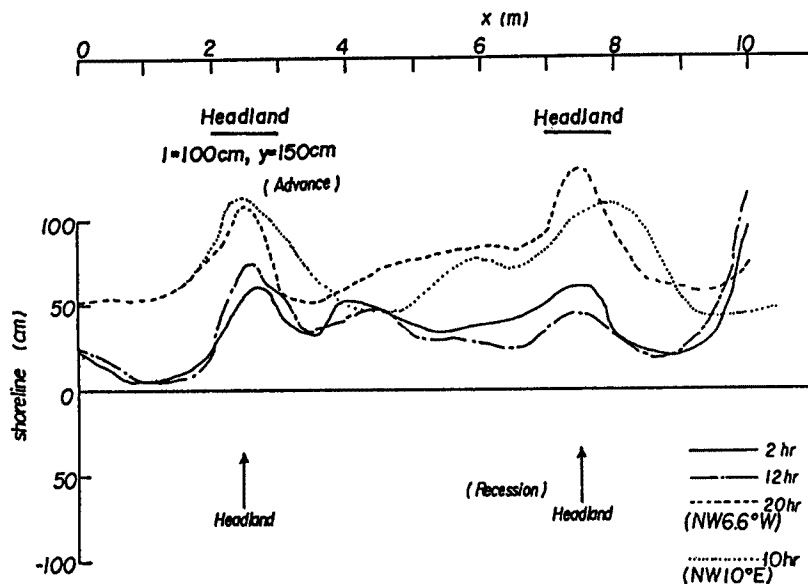


Fig. 8.9. Shoreline change and formation of stable sandy beach by headlands in case of initially dissipative beach.

を投入し東側のヘッドランドの突堤の左側に 14000 m^3 の養浜をしたが、この図からわかるように初期汀線よりかなり汀線が前進してきてきおり、ブロックまで波は到達していない。その後、20時間造波したところ汀線は前進したが、汀線の平面形状は必ずしも一つの弧状とはならない。これは実験ではかなり沖まで移動床であるため、初期海浜の造成時にある程度の凹凸の発生が避けられず、このため入射波高の沿岸方向分布が一様でなくなるため、ヘッドランド中央部付近に離岸流が発生しやすくなっており、波向きが1方向の規則波であることから、それが顕著に現われたと思われる。

次に、初期海浜として消散型海浜を造営し、反射型の場合と同様に最初からヘッドランドを設置して海浜変形の実験を行なった。このときの汀線変化を Fig. 8.9 に示すが、これから実験の経過とともに次のように考察される。2時間経過後には、初期汀線にバームが乗り上げて汀線が前進してかなり美しい汀線が形成

され、さらに32時間経過後には入射波がヘッドランドに挟まれた海域で円弧状に広がって発散し、それぞれのヘッドランド背後の舌状砂州の沿岸方向の端部の影響がほとんど消滅することがわかったので、その後波向きを 6.6° 西側に振って若干の沿岸漂砂を発生させたが、沿岸漂砂の下手側の汀線後退も初期汀線まで至っておらず、この状態で安定であることが見いだされた。

以上のことから、反射型あるいは消散型の初期海浜の如何を問わず、ヘッドランドの築造によって汀線は前進し、その背後に舌状砂州が形成され、1つの安定な海浜に到達することが認められた。しかも、波向が 15° 程度東西に偏ってもヘッドランド間では汀線形状が東西に少し変化するのみで、初期汀線より後退する場合は生じないことがわかった。しかし、前述したように、移動床実験では沿岸方向の波高の一様性の確保が困難であるため離岸流がヘッドランド間の中央部付近に発生しやすく、これに起因して、汀線が一つの美しい弧状にはならないけれども、ここで形成された海浜は安定海浜に接続するものと理解される。

結 語

本報告では、まず上越、大潟海岸の主要な侵食原因を要約した後、大規模海浜過程の研究成果に基づいて、基本的な侵食制御の具体的な方法論を展開し、長期的観点からこの海岸を安定化させる方法として、自然の安定な砂浜の存在とその平面形状が理論的に求められたことを背景にして安定な砂浜群を形成させることによって砂浜の保全を図ろうという安定海浜工法の具体的な適用方法を示し、その設置上の問題点のほかヘッドランドの構造、規模などについて考察するとともに、施工順序についても言及した。

ついで、この海岸の侵食を制御し、長期の保全を図るための具体的な工法として、離岸堤、人工リーフ工法および安定海浜工法をとりあげ、それらの適用性を水理模型実験によって詳細に検討し、それらの安定海浜の形成における適用性と問題点についてそれぞれ考察した。その結果、離岸堤および人工リーフ工法では原理的に安定海浜が形成できるという保証が存在しないため、この海岸では安定海浜工法が最適であって、これにより安定海浜群を形成させることができることを若干実験上の限界を残したが実験的に確かめることができた。とくに、一対のヘッドランドによるトンボロ地形の形成過程の実験から、それらのトンボロ地形がお互いに協同し、融合するときの一つの安定な弧状の砂浜が形成されることがわかり、この工法の基本を実験的に確認することができた。現汀線より後退しないことを条件として安定海浜群を造成し、形成させるための最少養浜砂量について考察するとともに、ヘッドランド背後に低天端、緩傾斜の突堤を併設し、ここを横切る沿岸漂砂を阻止すれば舌状砂州の形成が促進され、安定海浜の形成に有効であることを実験的に確かめることができた。さらに、上越、大潟海岸において具体的に安定海浜工法を適用する場所が波エネルギー反射型あるいは消散型のいずれにあっても、前者では養浜の実施と一対のヘッドランドの築造、後者では一対のヘッドランドの建設によって安定な砂浜海浜を造成し、形成できることを実験的に示し、また波向が変化する波浪条件における汀線変化は初期汀線より後退しないことが見いだされ、これらのことから安定海浜工法の適用性を実験的に十分認識することができた。

最後に、本研究では新潟県土木部よりの依頼によって調査研究してきたもののうち、上越、大潟海岸の侵食対策として安定海浜工法の適用を提案したものであり、この間熱心にご協力いただいた土木部河川課の諸官とくに五十嵐技師に深謝する次第である。同時に、長期にわたって絶大なご協力、ご援助をいただいていた大潟町役場、才浜漁業協同組合の方がたをはじめ、地元住民の方がたに厚く謝意を表明する。

なお、本研究は文部省科学研究費一般研究（B）（代表者：土屋義人 No. 03452212）による研究の一部であることを明記する。

参 考 文 献

- 19) 土屋義人・山下隆男・都丸徳治：海岸構造物による海岸侵食とその制御（2）－上越、大潟海岸の大規

- 模海浜過程と海岸侵食制御一, 京大防災研年報, 第36号 B-2, 1993, pp. 345-383.
- 20) 土屋義人: 安定海浜の形成と海岸侵食制御について—安定海浜工法とは?—, 第22回海岸実務講習会講義集, 1990, pp. 11-26.
 - 21) Tsuchiya, Y. and H. E. A. A. Refaat: Formation of stable sandy beaches; Theory and application, Jour. Water. Way., Port & Hab., Ocean&Coast. Eng., ASCE (in review).
 - 22) 土屋義人・陳 活雄・和田宙司: 安定海浜の理論形状とその適用性, 海岸工学論文集, 第40巻, 1993, pp. 328-332.
 - 23) 山下隆男・土屋義人・熊谷隆宏: 安定海浜の形成の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第38号(1), 1991, pp. 391-395.
 - 24) 土屋義人: 大潟漁港について, 大潟波浪観測所20年の歩み, 京都大学防災研究所大潟波浪観測所, 1986, pp. 60-61.
 - 25) 土屋義人・芝野照夫・山下隆男・白井 亨: 糸魚川沿岸の侵食制御について, 京都大学防災研究所年報, 第29号B-2, 1986, pp. 727-762.
 - 26) 土屋義人: 海岸侵食から美しい砂浜へ, 建設月報, 446号, 1986, pp. 24-27.
 - 27) Hsu, R. C. & R. Silvester: Accretion behind a single offshore breakwater, Proc. ASCE, WW 3, 1988, pp. 115-126.
 - 28) 運輸省港湾局: 人工海浜の建設技術マニュアル, 1979, 112p.
 - 29) Kriebel, D. L., W. R. Dally and R. G. Dean: Undistorted Froude model for surf zone sediment transport, Proc. 20th ICCE, ASCE, Vol. 2, 1986, pp. 1296-1310.
 - 30) Ito, M. and Y. Tsuchiya: Similitude of beach profile change, Proc. 20th ICCE, ASCE, Vol. 2, 1986, pp. 1196-1209.
 - 31) Tsuchiya, Y. and M. Banno: Criterion of ripple formation by wave action, Proc. 22nd ICCE, ASCE, Vol. 2, 1988, pp. 1868-1881.
 - 32) 佐々木大造・日吉 功・宇多高明・中山 修: 大規模ヘッドランドの形成手法に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第36巻, 1989, pp. 454-458.
 - 33) 土屋義人: 安定海浜工法, その理論と実際, 土木学会誌, Vol. 76, 3月号, 1991, pp. 15-17.
 - 34) 加藤一正: 自然と人と技術の調和—和歌山県・白浜海岸環境整備事業—, 土木学会誌, Vol. 77, 1月号, 1992, pp. 8-11.
 - 35) Tsuchiya, Y., Y. Kawata, T. Yamashita, M. Kawasaki and S. Habara: Sandy beach stabilization; Preservation of Shirarahama beach, Wakayama, Proc. 23rd ICCE, ASCE, Vol. 3, 1992, pp. 3426-3439.