

# 航空写真による海蝕崖の後退に関する研究

堀 川 清 司\*・砂 村 継 夫\*\*

## 1. 結 言

わが国の海岸は、激しい侵蝕を受けており、最近特に海蝕崖の後退が、国土保全の立場から大きな問題となってきた。また、海蝕崖の後退にともなって生ずる土砂が、漂砂の重要な供給源となっている地域もある。図-1 は、海岸侵蝕の激しい地域(矢印)を示したものであり、図中番号をつけた地域は、従来海岸地理学者らによって調べられた海蝕崖後退の激しい地域を示す。表-1 はこれらの地域の後退速度および地質を示す。

ここでは、海蝕崖の後退とはどういう現象かということについて簡単に触れ、海蝕崖後退の変化を把握する方法として航空写真の利用法、最後に航空写真を用いた研究

例として、現在著者らが調査中の千葉県屏風ヶ浦～太東岬地区の一部のものと、第 21 回および第 22 回土木学会年次学術講演会において発表したもの<sup>1),2)</sup>に加筆したものを述べる。

## 2. 海蝕崖の後退について

ここに海蝕崖とは、“波の侵蝕によって形成された海岸の崖<sup>3)</sup>”をいい、海蝕崖の後退とは、“上述の崖が主に波の侵蝕によって後退する現象”をいう。

海蝕崖の後退に関与する最も重要な要因は、崖の基部での波の侵蝕力と、基部を構成する岩石の抵抗力である。崖の基部での波の侵蝕力は、深海での波のエネルギーに関係することは明らかであるが、つぎの諸要因により支配される：(i) 海底地形特性、(ii) 海浜幅、(iii) 海浜勾配、(iv) 海浜堆積物の粒径、(v) 潮汐など。波の侵蝕作用は、Compression, Cavitation, Abrasion などの作用を含むものと考えられる<sup>10)</sup>。侵蝕に対する岩石の抵抗力は、岩石の力学的諸性質(圧縮強度、引張強度、摩擦硬度など)のみならず層理、節理、断層などの岩石構造に支配される。地域によっては、岩石の性質を変化させる風化という要因も無視できない。

その他の要因として、崖の基部侵蝕に起因する崩落(Landslide)を考えねばならないだろう。これには岩石の力学的性質(特にせん断強度)ならびに、層理、節理、断層などの岩石構造により Slump, Debris fall, Rockfall などの諸形式<sup>11)</sup>がある。上述の崩落を促進する要因として降雨量、降雨の継続時間、雨量強度などがある。

上述した諸要因に比してあまり重要ではないが、地域によっては、降雨による崖の表面の侵蝕—雨溝侵蝕(Rill erosion)—なども考えられる。

図-2 は、海蝕崖後退の過程を示す模式図である。まず A についてみると、崖(A-I)の基部が侵蝕され崩落が起こり、基部に崖錐(Talus)が形成される(A-II)。崖錐が波によって運搬・除去されない間は、崖の基部は波の侵蝕から免れる。A-II の崖錐が除去され、さらに基部が侵蝕されたため、再び崩落が起こり崖錐が形成され

図-1 海岸侵蝕の激しい地域

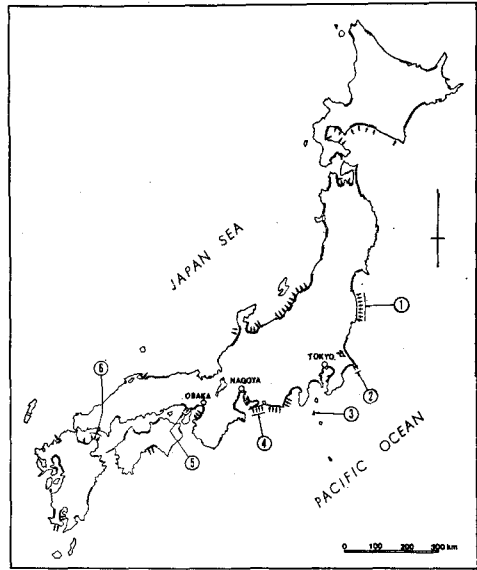
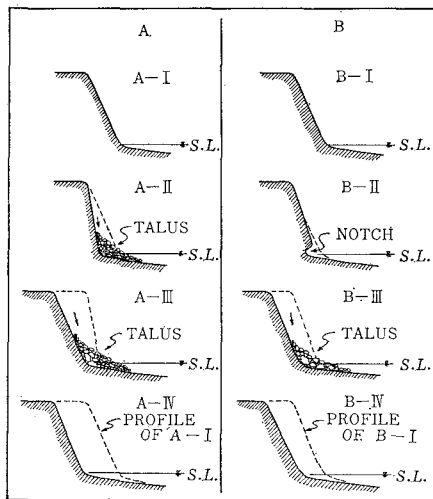


表-1 図-1 に示された地域の後退速度および地質

| 地 域          | 後 退 速 度                        | 地 質                   |
|--------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1. 常 磐 海 岸   | 0.3-0.7 m/year <sup>3)</sup>   | 砂岩, 砂質泥岩, 泥岩…第三系(鮮新統) |
| 2. 屏 風 ケ 浦   | 0.4-1.1 m/year <sup>1)</sup>   | 泥岩…第三系(鮮新統), 洪積層…第四系  |
| 3. 新島, 羽 伏 浦 | 5.5 m/year(mean) <sup>5)</sup> | 火山灰砂…第四系              |
| 4. 渥美半島南部海岸  | 0.6 m/year(max) <sup>6)</sup>  | 洪 積 層…第四系             |
| 5. 明 石 海 岸   | 0.1 m/year(mean) <sup>7)</sup> | 洪 積 層…第四系             |
| 6. 国東半島北部海岸  | 2.2 m/year(mean) <sup>8)</sup> | 火山碎屑岩(未固結)…第四系        |

\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部  
\*\* 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

図—2 海蝕崖後退の過程を示す模式図  
(注: 左右の図, たとえば A-Ⅲと B-Ⅲは  
時間的に対応していない)

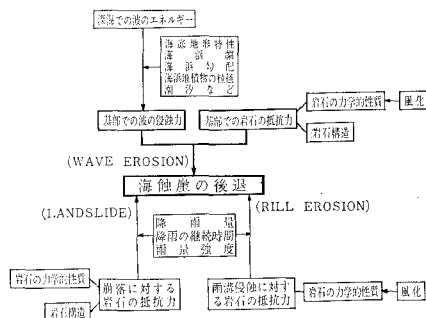


(A-Ⅲ), これが除去され(A-Ⅳ), 基部は波の侵蝕を受ける。Bでは, 崖(B-I)の基部が侵蝕されたため, 波蝕窪(Notch)が形成される場合である(B-II)。この波蝕窪がさらに発達すると, 崩落が起こり崖錐が形成され(B-Ⅲ), これが波によって除去され(B-Ⅳ), 再び基部が侵蝕される。侵蝕されると同時に崩落が起こる場合(A)と, 波蝕窪が形成される場合(B)とがあるが, これは崖を構成する岩石の力学的性質および層理, 節理, 断層等の岩石構造によるものと考えられる。

A, B に共通していえることは, つぎに示すような循環過程が存在するということである: 基部での波の侵蝕→崩落→崖錐の形成→波による崖錐の運搬・除去→基部での波の侵蝕。

ここで, 海蝕崖の後退に関する諸要因をまとめてみると図—3 のようになる。

図—3 海蝕崖後退に関する諸要因



### 3. 海蝕崖後退の研究における航空写真の利用法

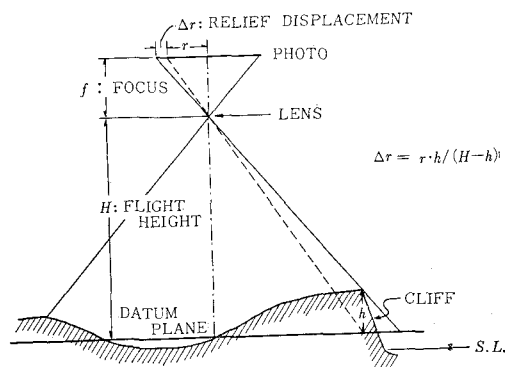
海蝕崖の後退距離を求める方法として, 従来つぎ

のような種々のものが用いられてきた。地形図(約 1/10 000)<sup>12)</sup>, 地籍図(縮尺不明)<sup>13)</sup>, 国有林分布図(1/50 000)<sup>14)</sup>, 測量<sup>15)</sup>,<sup>16)</sup>, 水平写真<sup>17)</sup>,<sup>18)</sup>など。測量以外の方法では, 高い精度で後退距離を求めることは困難であるし, 上述の方法で求められた後退距離は, 10~10<sup>2</sup> 年といった長期間のものである。測量の場合でも, 急傾斜の崖の部分では高い精度のものは望めない。特に崖の基部に海浜がなく, そこまで波が到達している地域では, 急傾斜部分の測量は不可能といってもよい。なお上述した方法で求められた後退距離は水平写真の場合\*を除き, すべて崖の頂部におけるものと考えられる。

波の侵蝕力および岩石の抵抗力との関連において, 海蝕崖の後退を論ずる場合には, 後退距離としては, 崖の基部でのものが必要であり, また短期間の崖の変化を高い精度で知ることが重要になってくる。崖の後退にとまって生ずる土砂量を知るためには, ぜひとも崖の profile を描くことが可能でなければならない。このような要求を満すものとして, 航空写真による方法が考えられる。以下に航空写真を用いるにあたって注意しなければならない諸点について述べる。

航空写真は, カメラの傾きによるひずみと起伏によるひずみ(図—4)とを持っている。写真の端に示された計器盤の中にカメラの傾きを表わす水準器があるが, これはカメラのシャッターの開く瞬間と, 水準器の気泡の動く間に time lag があるため, 厳密な傾きを表わしていないし, また完全に鉛直に撮影されている写真はないといつてよい。この傾きと撮影高度による像のずれを直す偏位修正を行なった写真を用いれば, 上述の起伏によるひずみを補正することができる。しかし, この方法では時間と経費がかかる割には, 精度の高い測定はむずかしい。したがって数メートルのオーダーの後退距離を高い精度で求めたり, 崖の profile を描くための等高線を知るためには図化機を用いて写真を図化し, 大縮尺の地形図(図化縮尺 1/2 000 以上)を作製することが必要で

図—4 起伏によるひずみ (Relief displacement)



\* 岬の部分の後退を扱ったものである。

ある。この際原図からトレースする時に入る誤差を少なくするために、ある種の乳剤を付着したフィルム・ベース（スクライブ・ベースとよばれる）を用い、図化機の鉛筆のかわりに針を取付け、直接この針でフィルム・ベースに傷をつけて描くスクライビング法を用いることが望ましい。等高線間隔は  $C\text{-factor}^*$  の値による。また図化精度は、使用する図化機の性能ならびに写真縮尺と図化縮尺によって決定される。地形図上から後退距離などを測定する場合は、 $1/20\text{ mm}$  程度まで読取れるマイクロメーターを用いると便利である。なお当然のことながら、撮影高度、撮影位置の関係で図-4 に示したような崖の基部が撮影されていない写真からは、そこでの後退距離などを求めることはできない。図化、図化機、図化精度および  $C\text{-factor}$  の値などについては、写真測量関係の文献<sup>19)</sup>を参照して戴きたい。密着写真および引伸し写真は、調査地域の概況を調べたり、調査計画をたてたり、あるいは海蝕崖基部での崖錐の有無、海浜の発達状況、崖の部分の植生などの判読に利用できるにすぎず、これらの写真から直接、距離や高度を求めても意味がないことは明らかである。

#### 4. 航空写真による海蝕崖後退の研究

航空写真の利用できる地域として千葉県屏ケ浦～太東岬地区と福島県大熊海岸を選んだ。千葉県のものについては千葉県土木部で撮影された写真、福島県のものについては東京電力で撮影された写真を利用させて戴いた。

##### (1) 千葉県太東岬付近の海蝕崖後退にともなう土砂量について

ここでは、現在著者らが調査中の千葉県屏ケ浦～太東岬地区のうちの太東岬付近の海蝕崖後退にともなって生ずる土砂量(以下侵蝕量とよぶ)について、航空写真をもとにして図化した地形図から、その概算値を求める方法および結果について述べる。なお崖の後退距離と構成岩石の強度および波浪との関係などについては今後の研究課題である。

本地域は第三系・鮮新統の砂岩および泥岩よりなり、その位置を図-5 に示す。本地域の海岸線の延長は約  $3\text{ km}$ 、海蝕崖の高度は平均海面上  $10\sim 70\text{ m}$  である。使用した航空写真は  $1960\text{ 年 }3\text{ 月 }19\text{ 日}$  および  $1966\text{ 年 }10\text{ 月 }30\text{ 日}$  に、千葉県土木部で撮影されたもので、写真縮尺はそれぞれ  $1/12\,000$  および  $1/8\,000$  である。図化された地形図(図-6 にその一部を示す)はおおの  $1/1\,000$  の縮尺をもち、使用した図化機はオートグラフ A7 およびステレオプロッター A8 である。なお図化精度は、現地に換算して約  $40\text{ cm}$  の誤差を含む。

まず  $1960\text{ 年}$  と  $1966\text{ 年}$  の地形図上に、原則として  $5$

\* 等高線間隔  $\Delta h$  と撮影高度  $H$  との比  $H/\Delta h$  を  $C\text{-factor}$  といい、この値は使用するカメラおよび図化機等によって異なる。

図-5 屏風ヶ浦～太東岬地区

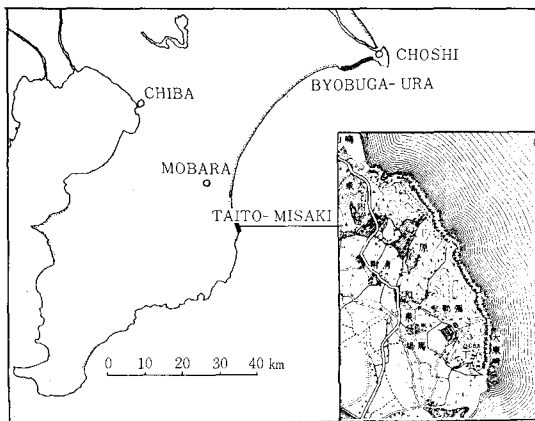


図-6 航空写真から作られた地形図(等高線間隔は  $2\text{ m}$ )

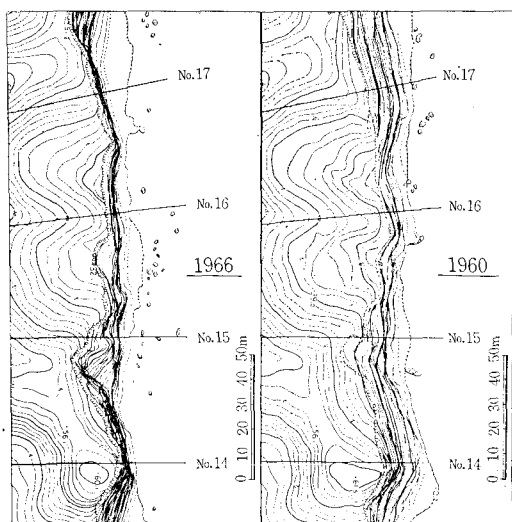
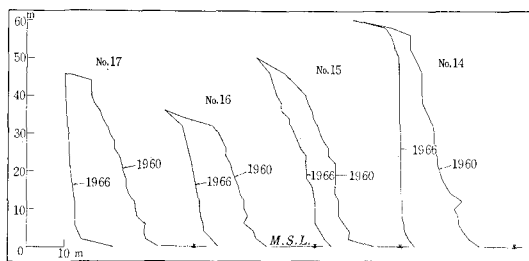


図-7 海蝕崖断面図



$\text{cm}$  (現地に換算して  $50\text{ m}$ ) 間隔で、おおのの海蝕崖の等高線にできる限り直角になるような直線(たとえば図-6 の No. 14, 15, 16, 17) を 37 本引き、崖の profile を描く。図-7 に、図-6 の No. 14, 15, 16, 17 に対応した profile を示す。つぎにこれら 37 の profile から断面積  $S$  を計算する。平均海面上  $h_m$  の所の後退距離を  $D_h$ 、平均海面から  $1960\text{ 年}$  の崖の傾斜変換点(地形図上  $\text{mm}$  の記号で示されている)までの高さを  $H$  と

図-8

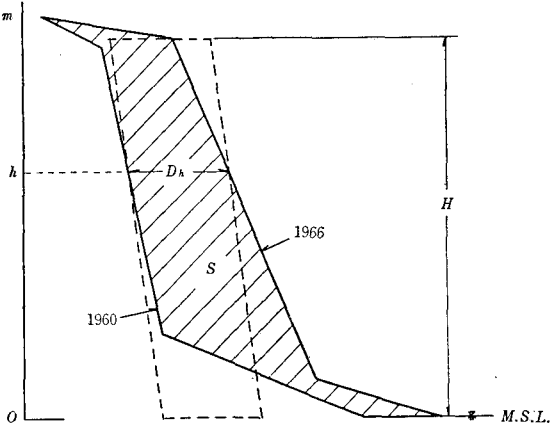


図-9 断面積  $S$  と  $D_{10} \cdot H$  との関係

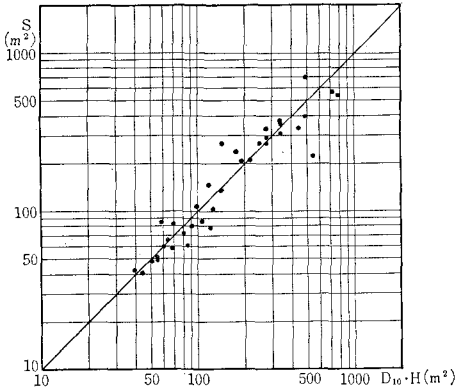
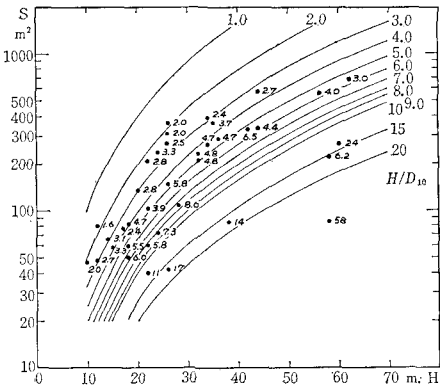


図-10 断面積  $S$  と崖の高度  $H$  との関係  
(曲線は崖が平行後退するものとして計算した結果)

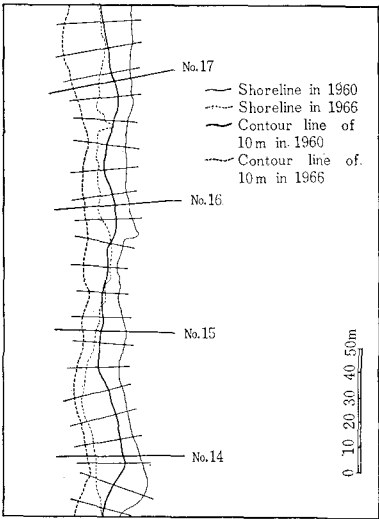


し (図-8 参照),  $S$  と  $D_h \cdot H$  とが最もよい相関を示すような  $h$  を求めると,  $h=10\text{m}$  になる。図-9 は  $S$  と  $D_{10} \cdot H$  との相関を示す。図-10 は, 縦軸に断面積  $S$ , 横軸に高さ  $H$ , パラメーターに  $H/D_{10}$  をとって, 表-2 の結果をプロットしたものである。図中の曲線は, 崖が全く平行に後退するものとして計算した結果である。この図から近似的には崖が平行後退しているものと仮定すれば, 次式が成り立つ。

表-2

| 地 点<br>(No.) | $S(\text{m}^2)$ | $H(\text{m})$ | $D_{10}(\text{m})$ | $H/D_{10}$ |
|--------------|-----------------|---------------|--------------------|------------|
| 1            | 230.7           | 32            | 6.7                | 4.8        |
| 2            | 692.2           | 62            | 7.7                | 8.0        |
| 3            | 83.9            | 58            | 1.0                | 58.0       |
| 4            | 266.7           | 60            | 2.4                | 24.0       |
| 5            | 221.6           | 58            | 9.4                | 6.2        |
| 6            | 390.7           | 34            | 14.1               | 2.4        |
| 7            | 101.5           | 22            | 5.7                | 3.9        |
| 8            | 208.0           | 22            | 8.6                | 2.8        |
| 9            | 237.6           | 24            | 7.2                | 3.3        |
| 10           | 48.6            | 12            | 4.5                | 2.7        |
| 11           | 71.9            | 24            | 3.3                | 7.3        |
| 12           | 42.1            | 26            | 1.5                | 17.0       |
| 13           | 364.9           | 35            | 9.6                | 3.7        |
| 14           | 544.2           | 56            | 14.0               | 4.0        |
| 15           | 328.0           | 42            | 6.5                | 6.5        |
| 16           | 358.2           | 26            | 12.9               | 2.0        |
| 17           | 562.2           | 44            | 16.3               | 2.7        |
| 18           | 332.0           | 44            | 10.0               | 4.4        |
| 19           | 135.4           | 20            | 7.1                | 2.8        |
| 20           | 286.9           | 36            | 7.6                | 4.7        |
| 21           | 84.2            | 38            | 2.8                | 13.6       |
| 22           | 209.4           | 32            | 6.7                | 4.8        |
| 23           | 107.1           | 28            | 3.5                | 8.0        |
| 24           | 40.1            | 22            | 2.0                | 11.0       |
| 25           | 78.2            | 17            | 7.1                | 2.4        |
| 26           | 82.1            | 18            | 3.8                | 4.7        |
| 27           | 267.0           | 34            | 7.3                | 4.7        |
| 28           | 148.4           | 26            | 4.5                | 5.8        |
| 29           | 265.3           | 26            | 10.6               | 2.5        |
| 30           | 79.8            | 12            | 7.5                | 1.6        |
| 31           | 304.8           | 26            | 13.0               | 2.0        |
| 32           | 60.3            | 22            | 3.8                | 5.8        |
| 33           | 47.9            | 10            | 5.0                | 2.0        |
| 34           | 50.3            | 18            | 3.0                | 6.0        |
| 35           | 59.6            | 18            | 3.3                | 5.5        |
| 36           | 58.3            | 15            | 4.5                | 3.3        |
| 37           | 65.0            | 14            | 4.5                | 3.1        |

図-11 1960 年と 1966 年における汀線および 10 m 等高線



$$V \approx D_{10} \cdot H \cdot L \dots\dots\dots (1)$$

ここに,  $V$  は侵蝕量,  $L$  は海蝕崖の部分の海岸線に沿った長さである。式 (1) により, 以下に侵蝕量を計算

する\*。1960年と1966年の地形図上から10m等高線をぬき書きしたものを作り、おのおのの等高線にできるだけ直角になるような直線を、現地に換算して10m間隔で入れた図(図-11に、図-6に対応した部分を示す)から $D_{10}$ を読みとり、そこでの高さ $H$ を1960年の地形図上から求め、式(1)を使って侵蝕量を求めると、 $V \approx 409\,000\text{ m}^3$ となる。(ただし、これを計算する時に、谷の部分および傾斜の変換点をもたない崖の区域、すなわち $H$ が求められない区域を除いた)。したがって年平均約 $62\,000\text{ m}^3$ の土砂量が海蝕崖の後退にともなって、海中に放出されたことになる。当海岸の崖の部分の延長(海岸線方向の)が約2kmであるから、1kmあたりの年間放出土砂量は約 $31\,000\text{ m}^3$ となる。

## (2) 福島県大熊町海岸の海蝕崖の後退について

a) 調査地域概観 福島県の太平洋沿岸に広く分布する段丘の東縁には、海蝕崖が発達しており、本調査地域(図-12, 13)の海蝕崖は、平均海面上30~35mの高度をもち、第三系・鮮新統の軟弱な砂岩、比較的massiveな泥岩および崖の頂部の段丘礫層からなる(図-14, 15)。海底勾配は沖合450mまでは約1/40の急勾配、それ以沖は約1/130の緩勾配であり、水深5m以

深の等深線は、海岸線にほぼ平行に走る(図-12, 13)。本地域での平均潮差は約1.3mで、海蝕崖基部の砂浜は満潮時には海面下に没し波は崖の基部に到達する。海面下の砂層の厚さは最大で2m程度で、水深が増すにつれて減少し、水深10m付近から基盤が露出する。

b) 後退距離と岩石の強度との関係 本地域の海岸線の延長は約900mであり、原則として50m間隔で19測点を設け、そこでの後退距離ならびに岩石の強度を調べた。ただし谷口の部分にあたる測点および突出部の測点(測点12)を除いたため、13点である(図-13)。

後退距離は、1947年4月5日、1961年9月18日、1963年10月9日に撮影された航空写真(写真縮尺はそれぞれ1/40 000, 1/12 000, 1/12 000)をもとにして図化した地

図-13 調査地域の地形および測点

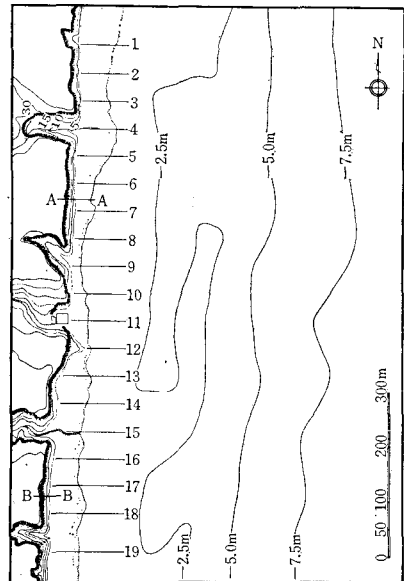


図-15 地形断面図

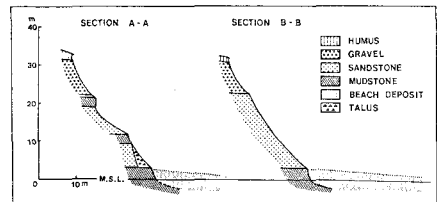


図-12 調査地域

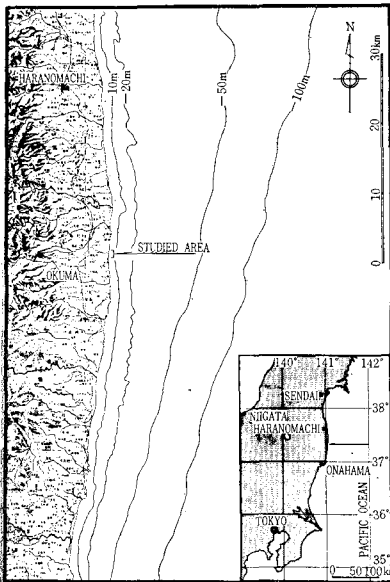
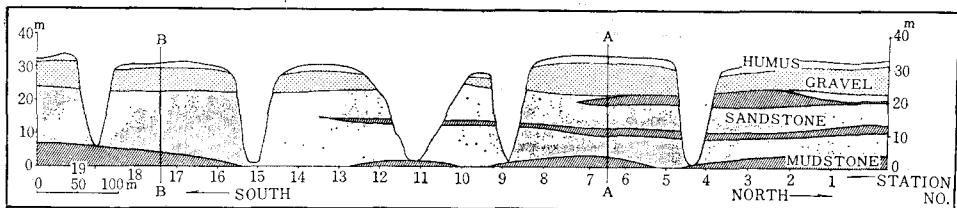


図-14 地質断面図



\* 高さが40m以上の場所では、平行後退として計算すると誤差が大きくなる(図-10参照)。

形図 (縮尺はそれぞれ 1/2 000, 1/1 000, 1/1 000) ならびに 1965 年 8 月 31 日に実測された 1/200 地形図から求めた。ここで後退距離は崖の基部でのものである。なお上記航空写真の図化にあたっては、オートグラフ A 7 およびステレオプロッター A 8 を用いた。

侵蝕に対する岩石の抵抗力を示す一つの指標である岩石の強度は、ここでは海蝕崖基部での岩石の一軸圧縮強度\*をもって示すことにする (表-3)。

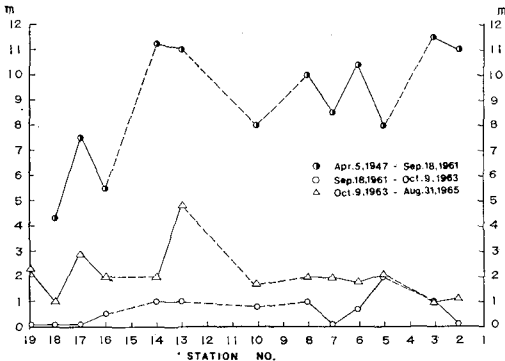
図-16 は後退距離の場所的变化を示す。図-17 は後退距離と岩石の強度との関係を示す。縦軸に後退距離、横軸に一軸圧縮強度をとって表-3 の結果をプロットしたものである。圧縮強度が増すと後退距離が減少するという一般的な傾向は見られるが、かなり点のばらつきがある。これはつぎに示す理由によるものと思われる。

(i) 崖の基部での波の侵蝕力が場所および時間によ

表-3 後退距離、後退速度、基部での岩石およびその一軸圧縮強度

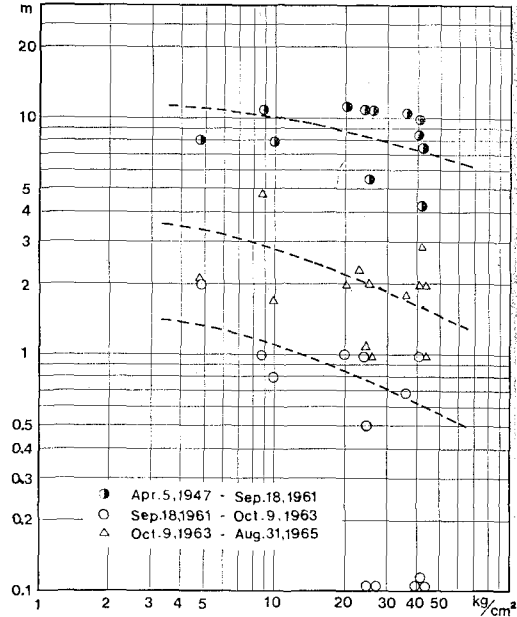
| 測点 | 1947年 4 月 5 日 |        | 1961年 9 月 18 日 |        | 1963年 10 月 9 日 |        | 岩 石 | 一軸圧縮強度<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----|---------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|-----|---------------------------------|
|    | m             | m/year | m              | m/year | m              | m/year |     |                                 |
| 1  | gully mouth   | —      | —              | —      | —              | —      | —   | —                               |
| 2  | 11.0          | 0.76   | 0.1            | 0.05   | 1.1            | 0.58   | 泥岩  | 24.9                            |
| 3  | 11.5          | 0.79   | 1.0            | 0.48   | 1.0            | 0.53   | 泥岩  | 25.0                            |
| 4  | gully mouth   | —      | —              | —      | —              | —      | —   | —                               |
| 5  | 8.0           | 0.55   | 2.0            | 0.95   | 2.1            | 1.11   | 砂岩  | 4.8                             |
| 6  | 10.4          | 0.72   | 0.7            | 0.33   | 1.8            | 0.95   | 泥岩  | 36.1                            |
| 7  | 8.5           | 0.59   | 0.1            | 0.05   | 2.0            | 1.05   | 泥岩  | 40.4                            |
| 8  | 10.0          | 0.69   | 1.0            | 0.48   | 2.0            | 1.05   | 泥岩  | 41.0                            |
| 9  | gully mouth   | —      | —              | —      | —              | —      | —   | —                               |
| 10 | 8.0           | 0.55   | 0.8            | 0.38   | 1.7            | 0.90   | 砂岩  | 10.0                            |
| 11 | gully mouth   | —      | —              | —      | —              | —      | —   | —                               |
| 12 | promontory    | —      | —              | —      | —              | —      | —   | —                               |
| 13 | 11.0          | 0.76   | 1.0            | 0.48   | 4.8            | 2.52   | 砂岩  | 8.8                             |
| 14 | 11.2          | 0.77   | 1.0            | 0.48   | 2.0            | 1.05   | 砂岩  | 20.3                            |
| 15 | gully mouth   | —      | —              | —      | —              | —      | —   | —                               |
| 16 | 5.5           | 0.38   | 0.5            | 0.24   | 2.0            | 1.05   | 泥岩  | 24.8                            |
| 17 | 7.5           | 0.52   | 0.1            | 0.05   | 2.9            | 1.53   | 泥岩  | 41.4                            |
| 18 | 4.3           | 0.30   | 0.1            | 0.05   | 1.0            | 0.53   | 泥岩  | 42.0                            |
| 19 | —             | —      | 0.1            | 0.05   | 2.3            | 1.21   | 泥岩  | 23.3                            |
|    | 8.9*          | 0.62*  | 0.65*          | 0.31*  | 2.05*          | 1.08*  |     | *...平均値                         |

図-16 後退距離の場所的变化



\* 湿潤圧縮強度を示す。加圧速度は 0.2 kg/cm<sup>2</sup>/sec である。

図-17 後退距離と岩石の強度 (一軸圧縮強度) との関係



って異なる。

(ii) 波に対する岩石の抵抗力を表わす岩石の力学的性質は、前述したように圧縮強度、引張強度、摩擦硬度などによるが、ここでは一軸圧縮強度のみで代表させている。

(iii) 崩落に關係する諸要因が場所および時間により異なる。

図-18 は、山内の資料<sup>20)</sup>を著者らが整理しなおしたものである。山内の調査地域は、原町市付近の海蝕崖 (本地域の北、約 20 km) であり、海岸線の延長は約 3 km である。図において、縦軸は 1912 年から 1959 年までの 47 年間の後退距離、横軸はペネトロメーターを用いて測定した崖の基部に露出する泥岩および腐植土の貫入値である。貫入値は値が大きくなるほど、貫入しやすいことを示している。一軸圧縮強度と同様に、貫入値

図-18 原町市大壺海岸における海蝕崖の後退距離と岩石の貫入値との関係 (H は腐植土を示す。その他は泥岩)

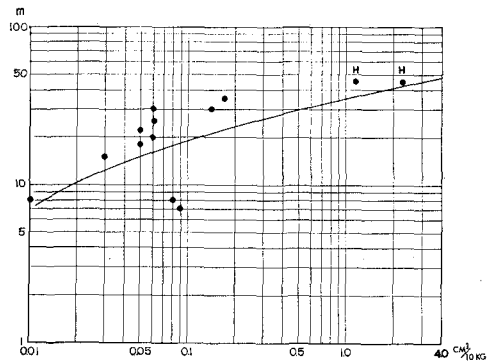
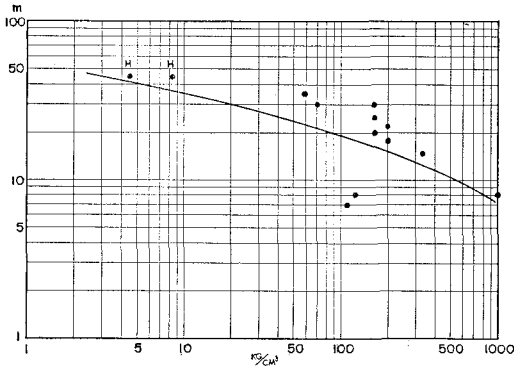


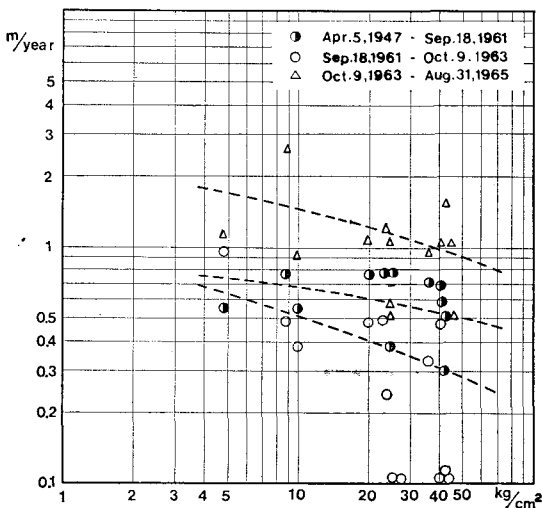
図-19 図-18 を書きかえたもの(横軸は貫入値の逆数)



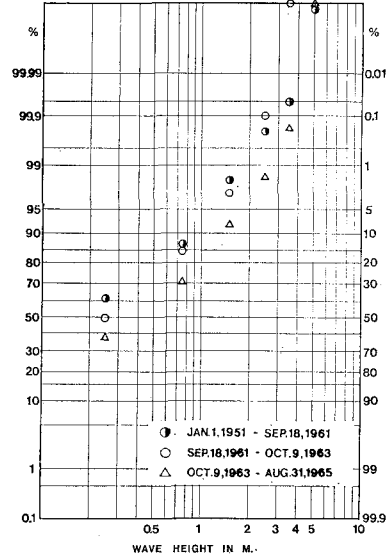
も波に対する岩石の抵抗力を示す一つの指標にすぎないと思われる。図-17 と比較するため、図-19 は横軸に貫入値の逆数をとってプロットしなおしたものである。貫入値がある程度岩石の硬軟を表わしているものとするれば、岩石が硬くなるにつれて後退距離が減少するという傾向はあらわれているが、一軸圧縮強度の場合と同様に、かなり点のばらつきが見られる。

c) 後退速度と波浪出現頻度との関係 後退速度として、年平均の後退距離 (m/year) をもって表わすとすれば図-20 のようになる。ここで横軸は一軸圧縮強度を示す。1947 年から 1961 年までの後退速度の平均は約 0.6 m/year, 1961 年から 1963 年は約 0.3 m/year, 1963 年から 1965 年は約 1.1 m/year であり、考える期間により後退速度は大きく変化する<sup>21)</sup>。明らかに 1963 年から 1965 年までの後退速度は、それ以前に比して大きな値を示している。図-21 に示した波浪の出現頻度は、本地域では長期間の波浪観測を行っていないため、55 km 南の小名浜での目視観測の資料<sup>\*, 22)</sup>をもとにして求められたものである。しかし 1951 年以前は欠測であるため、

図-20 後退速度と岩石強度との関係



\* この資料には周期に関する記録はない。

図-21 波高の出現頻度  
(小名浜での目視観測の資料による)

1951 年から 1965 年までの 15 年間の結果を掲げる。この図より明らかなように、1963 年から 1965 年までに観測された波浪は、それ以前に比して高い波高出現頻度を持ち、波高の出現頻度と後退速度とは相関がみられる。

d) 今後の後退距離の推定 海蝕崖を後退させるような波浪の特性およびその時の後退距離などを示す資料が得られるならば、今後の後退距離を推定することは、さほど困難なこととは思われない。しかしこのような資料を入手できない現在、著者らはつぎに述べるような非常に簡略化された方法によって、今後の後退距離の推定を試みる。

まず海蝕崖基部での後退距離  $X$  と波の侵蝕力  $f$  とが linear な関係にあり、侵蝕力  $f$  によって  $dt$  時間に後退距離が  $dX$  になると仮定すると

$$dX = C_R f dt \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $C_R$  は波による岩石の侵蝕されやすさ、すなわち Erosibility を示す係数である。なお  $C_R$  と岩石の抵抗力  $R$  とには、 $C_R \sim 1/R$  なる関係が成立するものと思われる。

波の侵蝕力は、前述したように Compression, Cavitation, Abrasion などの作用を含むものと考えられるが、ここでは Compression のみを考えて、波の侵蝕力  $f$  は次式で示されるものとする。

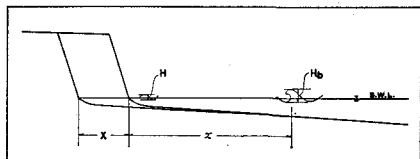
$$f = kH \dots \dots \dots (3)$$

ここに  $H$  は砕波後の波高 (海蝕崖基部での)、 $k$  は係数である。さらに  $H$  に対して次式<sup>23), 24)</sup>が成立するものと仮定する。

$$H = H_b e^{-\alpha x} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $H_b$  は砕波波高、 $x$  は砕波点から海蝕崖基部

図-22



までの距離、 $\alpha$ は係数\*である(図-22 参照)。

式(3)、(4)より、

$$f = kH_b e^{-\alpha x} \dots\dots\dots(5)$$

式(5)を時間  $t$  で微分して、

$$\frac{df}{dt} = -\alpha f \frac{dx}{dt} \dots\dots\dots(6)$$

ここで  $dx/dt = \text{const.}$  の場合、すなわち砕波点より崖の基部までの距離が時間とともに一定の割合で増加する場合と、 $dx/dt = 0$  の場合、すなわち崖が後退するにつれて砕波点も岸側に一定間隔を保ちながら移動する場合との2つのみを考えることにする。

(i)  $dx/dt = \text{const.}$  の場合

式(6)はつぎのようになる。

$$\frac{df}{dt} = -\beta f, \quad \beta = \alpha \frac{dx}{dt} (= \text{const.}) \dots\dots\dots(7)$$

式(7)より、

$$f = C e^{-\beta t} \dots\dots\dots(8)$$

ここに  $C$  は積分定数である。

式(2)、(8)より、

$$\frac{dX}{dt} = C_R C e^{-\beta t} \dots\dots\dots(9)$$

式(9)より

$$X = \int_0^t C_R C e^{-\beta t} dt = C_R C (1 - e^{-\beta t}) / \beta \dots\dots\dots(10)$$

式(10)は、Popov<sup>25)</sup>が2次元水路を用いて行なった貯水池やアースダムののり面変形に関する実験結果と一致するものと考えられる。すなわち式(10)は、崖の後退にともなう生ずる土砂が海岸線に直角方向のみに運搬され、短時間に平衡縦断面形が形成されるような理想化された海岸における、時間と後退距離との関係を示しているものであろう。したがって式(10)を実際の海岸に適用することには問題がある。

(ii)  $dx/dt = 0$  の場合

式(6)はつぎのようになる。

$$f = C \dots\dots\dots(11)$$

ここに  $C$  は積分定数であるが、式(5)が示すように  $x$  が一定ならば、 $f$  は  $H_b$  の関数となり、したがって  $C$  もまた  $H_b$  の関数となる。式(2)、(11)より、

$$\frac{dX}{dt} = C_R C \dots\dots\dots(12)$$

式(12)より、

$$X = \int_0^t C_R C dt = \tau t, \quad \tau = C_R C \dots\dots\dots(13)$$

したがって、 $\tau$  が一定ならば後退距離と時間は linear な関係になる。

海蝕崖の後退が激しい海岸においては、海底の基盤も侵蝕され、崖が後退するにつれて、砕波点も岸側に一定間隔で移動するものと仮定して、式(13)を当海岸に適用する。 $\tau$ を計算するにあたり、波浪の資料は前述した小名浜でのものを用いるが、1951年以前が欠測であるため、1961~1963年、1963~1965年の2つの期間の資料を用いる。後退距離は場所的变化が大きい(図-16 参照)ため、表-3の下欄に示した平均値を用いる。なお上記期間内では、海底地形、海浜幅などの崖の基部での波の侵蝕力に影響をおよぼす要因ならびに、降雨量、雨量強度などの崩落、雨溝侵蝕に影響をおよぼす要因(図-3 参照)は、変化しなかったものと仮定する。

式(13)中の  $C$  は、前述したように  $H_b$  の関数であるから、 $\tau$  もまた  $H_b$  の関数である。しかし  $H_b$  と観測された波高とが linear な関係にあると仮定すれば、ある波高  $A$  に対して  $\tau$  は定数となる。式(13)中の  $t$  は、海蝕崖を後退させるような侵蝕力が作用した時間であるから、海蝕崖を後退させると考えられる波高が、 $T$  年間に  $\delta\%$  の頻度で襲来したならば、 $t$  はつぎのようになる。

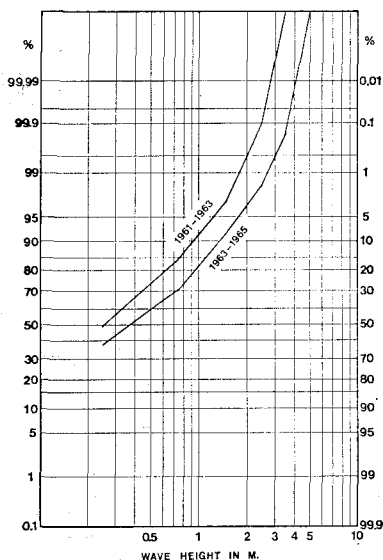
$$t = \delta T / 100 \dots\dots\dots(14)$$

式(13)、(14)より

$$\tau = 100 X / \delta T \dots\dots\dots(15)$$

ここで  $\delta$  は図-23より求めることができる。また  $X$  は表-3の下欄に示された値を使用する。計算結果(表-4)を用いて、おのおのの期間における  $\tau$  と波高  $A$  との

図-23 波高の出現頻度  
(図-21を書きかえたもの)

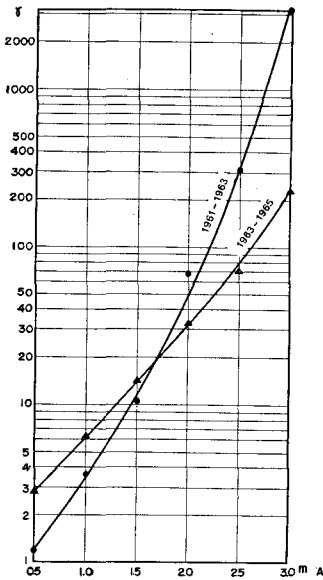


\* 実際には、 $\alpha$ は周期および水深の関数であるが、ここでは定数として扱うことにする。



表-4 計算結果

| 波高<br>$A(m)$ | 期 間                       | $T(year)$ | $X(m)$ | $\delta(\%)$ | $r$                |
|--------------|---------------------------|-----------|--------|--------------|--------------------|
| 0.5          | 1961年9月18日～<br>1963年10月9日 | 2.1       | 0.65   | 26.0         | 1.19               |
|              | 1963年10月9日～<br>1965年8月31日 | 1.8       | 2.05   | 40.0         | 2.85               |
| 1.0          | 1961～1963                 | 2.1       | 0.65   | 8.5          | 3.68               |
|              | 1963～1965                 | 1.8       | 2.05   | 18.0         | 6.33               |
| 1.5          | 1961～1963                 | 2.1       | 0.65   | 2.9          | $1.07 \times 10$   |
|              | 1963～1965                 | 1.8       | 2.05   | 8.0          | $1.42 \times 10$   |
| 2.0          | 1961～1963                 | 2.1       | 0.65   | 0.5          | $6.19 \times 10$   |
|              | 1963～1965                 | 1.8       | 2.05   | 3.5          | $3.26 \times 10$   |
| 2.5          | 1961～1963                 | 2.1       | 0.65   | 0.1          | $3.10 \times 10^2$ |
|              | 1963～1965                 | 1.8       | 2.05   | 1.6          | $7.12 \times 10$   |
| 3.0          | 1961～1963                 | 2.1       | 0.65   | 0.01         | $3.10 \times 10^3$ |
|              | 1963～1965                 | 1.8       | 2.05   | 0.05         | $2.28 \times 10^3$ |

図-24  $r$  と波高との関係

関係を図-24に示す。ここで $r$ は両期間で一致しなければならない。図-24において2つの曲線の交点を求めると、 $r \approx 20$ となり、崖を後退させる波浪は、波高1.7m以上のものであるということになる。したがって式(15)に $r=20$ を代入して次式を得る。

$$X = 0.20 \delta T \dots\dots\dots (16)$$

式(16)は $T$ 年間に波高1.7m以上の波浪が、 $\delta\%$ の頻度で襲来したときの海蝕崖の後退距離を示すものである(図-25)。くり返し述べるが、上述の計算をする際に用いた波浪の資料は、当海岸のものではなく小名浜での目視観測の資料であるため、1.7mという絶対値には問題がある。なお参考までに、小名浜での目視観測による波高と当海岸の水圧式波高計(設置水深約10m)による $H_{1/3}$ との比較を図-26に示す。この図のみから判断すれば、波高の出現頻度には大きな差はないと考えられる。しかしこの図は1965年2月～8月の短期間の

図-25 波高出現頻度に対する後退距離と時間との関係

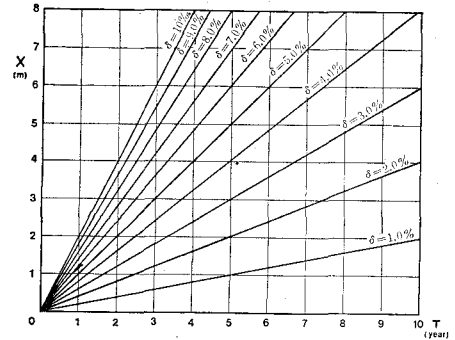
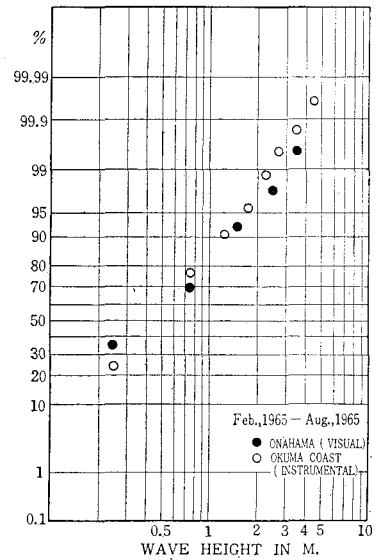


図-26 小名浜での目視観測による波高と大熊海岸での有義波高との関係



資料をもとにして作られたものである。

## 5. 結 語

航空写真を用いることにより、比較的短期間の海蝕崖の変化ならびに後退距離などを従来の方法に比して高い精度で把えることが可能であるが、現状では崖を後退させる主因である波浪の資料を入手することが困難である。海蝕崖の後退を研究するにあたり、できるだけ短期間における崖の後退距離とそれを引き起こした波浪の諸特性および崖を構成する岩石の力学的諸性質との関係を明らかにせねばならないであろう。

最後に、本研究をなすにあたりご指導戴いた東京大学名誉教授本間仁博士に謝意を表す。またこの研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

## 参 考 文 献

- 堀川清司・砂村継夫：海蝕崖の後退に関する研究，第21回土木学会年次学術講演会講演概要，1966。
- 堀川清司・砂村継夫：海蝕崖の後退に関する研究〔Ⅱ〕，第22回土木学会年次学術講演会講演概要，1967。

- 3) 山内秀夫：原町市大甕海岸における海蝕崖の後退について，地理評，37，pp. 138-146, 1964.
- 4) 川崎逸郎：千葉県飯岡町付近の地形，地理評，27，pp. 213-217, 1954.
- 5) 矢島昭弘：伊豆新島・羽伏浦における海崖の後退に関する研究，東京教育大学卒業論文，1966.
- 6) 山内秀夫：渥美半島南岸西部における海崖の後退に関する地形学的研究，東京教育大学学位論文，1964.
- 7) 吉川虎雄：海岸縦断面の発達，東京大学地理学研究，1，pp. 99-113, 1952.
- 8) 小向良七：函館大森浜付近の海岸侵蝕，水路部報告，13，上巻，序論，1959.
- 9) Thornbury, W.D. : Principles of Geomorphology, John Wiley, New York, p. 433, 1960.
- 10) Yatsu, E. : Rock Control in Geomorphology, Sozosha, Tokyo, pp. 34-35, 1966.
- 11) Sharpe, C.F.S. : Landslides and Related Phenomena, Pegeant Books, New Jersey, p. 67, 1960.
- 12) Steers, J.A. : Notes on Erosion along the Coast of Suffolk, Geol. Mag. 88, pp. 425-439, 1951.
- 13) 前掲 4)
- 14) 前掲 3)
- 15) Valentin, H. : Der Landverlust in Holderness, Ostengland, von 1852 bis 1952, Die Erde, 6, pp. 296-315, 1954.
- 16) 前掲 5)
- 17) Shepard, F.P. and U.S. Grant : Wave Erosion along the Southern California Coast, Bull. Geol. Soc. America, 58, pp. 919-926, 1947.
- 18) Byrne, J.V. : Coastal Erosion, Northern Oregon, Essays in Marine Geology in Honor of K.O. Emery, Univ. of Southern California Press, pp. 11-13, 1963.
- 19) たとえば，丸安隆和：測量学（下），コロナ社，東京，1958.  
尾崎幸男：写真測量，森北出版，東京，1961.  
Hallert, B. : Photogrammetry, McGraw-Hill, New York, 1960.
- 20) 前掲 3)
- 21) Steers, J.A. : Coastal Cliffs : Report of a Symposium, Geogr. Jour. 128, pp. 303-320, 1962.
- 22) 気象庁：海洋気象観測資料（小名浜），1951-1965.
- 23) Ijima, T., and Others : Wave Characteristics in the Surf Zone Observed by Stereophotography, Report of Transportation Tech. Research Inst. Report No. 31, 1958.
- 24) Horikawa, K., and C. Kuo : A Study on Wave Transformation inside Surf Zone, Proc. of 10th Conf. on Coastal Engineering, 1967.
- 25) Popov, I.J. : Experimental Research in Formation by Waves of Stable Profile of Upstream Faces of Earth Dams and Reservoir Shores, Proc. of 7th Conf. on Coastal Engineering, 1961.