

千葉県屏風ヶ浦の海岸侵蝕について

——航空写真による海蝕崖の後退に関する研究・第2報——

堀 川 清 司*・砂 村 継 夫**

1. 緒 言

従来から千葉県屏風ヶ浦は侵蝕の激しい海岸であるといわれているが、侵蝕に関する定量的資料は地籍図と実測により得られたもの¹⁾があるにすぎない。ここでは撮影年度の異なる航空写真を用いて海蝕崖の侵蝕状況を調べ、崖を構成する岩石の強度、波浪の出現頻度などの関連において崖の侵蝕機構を考察し、最後に侵蝕対策として施工されている消波堤の効果を検討する。

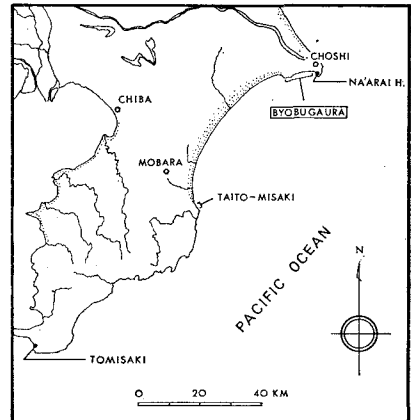
2. 調査地域の地形および地質概略

調査地域(図-1, 2, 3)の海岸線はほぼ直線状で、その距離は約 9 km である。崖の高度は 10~60 m であり、崖の基部を構成する岩石は調査地域の大部分を第三系・鮮新統の飯岡層と呼ばれる泥岩が占め、わずかに調査地域の東端において同じく第三系・鮮新統の名洗層と呼ばれる凝灰質砂岩が露出する。これらの地層を第四系の成田層(砂および礫から成る)が被覆し、さらにその上に関東ローム層がのる(図-4)。上述の地層はほぼ水平に堆積している(図-5)。崖の基部は、上部からの崩落物でおおわれている地域が多いが、基部における海底基盤の高度はほぼ L.W.L. (平均海面下約 0.7 m) 付近にある。海底基盤上の海浜堆積物の厚さは非常に薄く(恐らく 1 m 以下であろう)、海浜はほとんど発達していない。水深 5 m 以浅の等深線は海岸線とほぼ平行に走り、海底勾配は水深 2 m までは約 1/100、水深 5 m までは約 1/200 である。

3. 海象状況

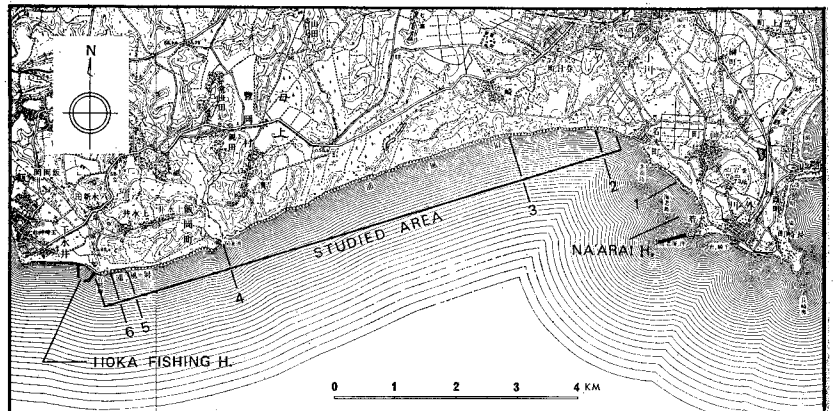
調査地域付近における波浪観測資料は名洗港(図-2)のもの²⁾に限られる。1955 年より 1964 年までの約 10 年間の資料であるが、かなり欠測期間が多い。図

図-1 調査地点



—6 は上記期間の有義波高と有義波周期との関係を示したものである。これによると周期は 5~15 sec、波高は最大のもので 8 m 程度である。波高が大きくなると周期も増大する傾向は見られるが、顕著ではない。なおこの資料は水圧式波高計(設置水深約 6 m)によって得られたものである。波向に関する資料は 1955 年より 1956 年までの約 1 年間のものがあるにすぎない。その間に欠測が多いが図-7 に整理した結果を示す。調査地域に襲来する波の方向は SSE~SSW と考えてよいであろう。飯岡漁港(図-2)における平均潮差は約 1.4 m である。

図-2 調査地域および岩石試料採取地点



* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東京大学工学部研究生

図-3 調査地域の地形および測点

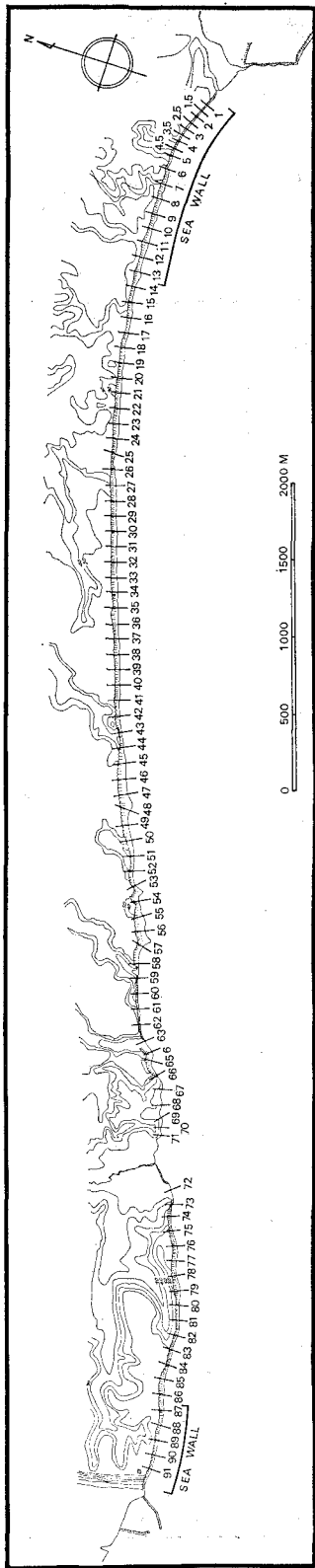


図-4 地質断面図

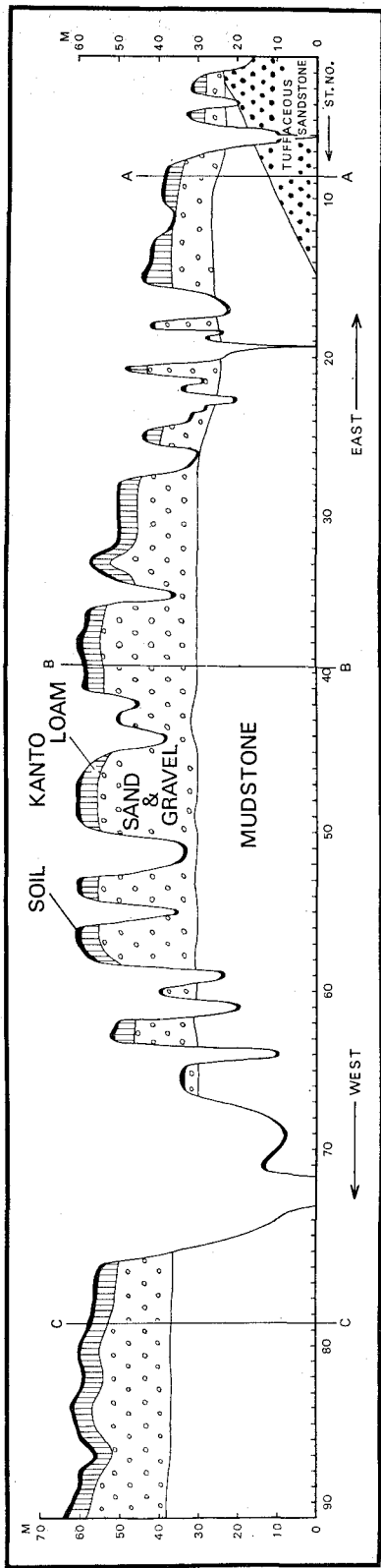
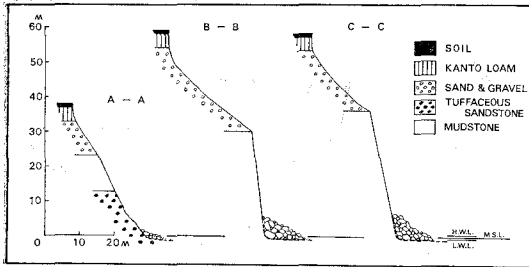


図-5 地形断面図



4. 構成岩石の力学的性質

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、摩耗強度など）のみならず層理、節理、断層などの岩塊中の不連続な部分に支配されると考えられる。機械的試験によって得られた上述の岩石の力学的諸性質がどの程度、波や流れに対する岩石の抵抗力を表現できるかという問題は未解決であるが、ここでは崖の基部を構成している岩石の圧縮強度と引張強度を調べるために図-2に示した6地点で試料を採取し試験を行なった。なお地点1は調査地域外であるが、地点2と同一の地層が崖の基部に露出している。

(1) 整形試料による圧縮強度

地点5を除き、試料は高さ約10cm、直径約5cmの円柱形である。地点5の試料は一辺の長さ約3.5cm、高さ約7.5cmの四角柱である。試料はすべて48時間水中に浸したものをを用いた。試験結果にバラツキが多いが、一般に泥岩の方が凝灰質砂岩よりも強度が大きく、その平均値は泥岩が9.7~23.9kg/cm²、凝灰質砂岩は6.1~8.1kg/cm²である（表-1）。

(2) 非整形試料による圧縮強度

上記の整形試料による圧縮強度は、岩石の塊の中で割れ目が存在していない部分の強度を示している。すなわち整形した試料を用いて測定された強度は岩石の塊の中で最も強固な部分の強度を示している³⁾。波などの力が崖を構成する岩石に作用した場合、一般に最も弱い部分から侵蝕が始まると考えられる。したがって岩塊のうちで最弱部分の強度がどの程度であるかを知ることは重要である。ここでは、この割れ目（微視的な）の影響を含めた強度を調べるために Protodyakonov が提案してい

図-6 有義波高と周期との関係

NA'ARAI (SEP., 1955-FEB., 1964)

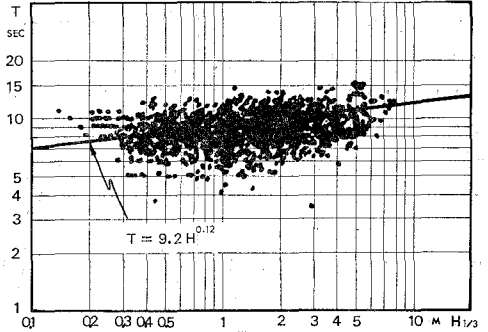
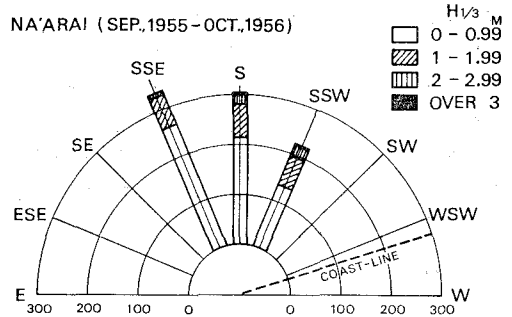


図-7 波高の出現回数

NA'ARAI (SEP. 1955-OCT. 1956)



る非整形試料による圧縮試験法⁴⁾を採用した。試料は重量約30~40gの紡錘形の岩片であり、48時間水中に浸したものをを使用した。平均値で比較すると凝灰質砂岩の強度は1.0~1.4kg/cm²、泥岩のそれは1.8~3.0kg/cm²（表-1）で、整形試料による圧縮強度と同様に、泥岩の方が凝灰質砂岩よりも強度が大きい。図-8は整形試料による圧縮強度 S_c と非整形試料による強度 S_c' との関

図-8 S_c と S_c' との関係

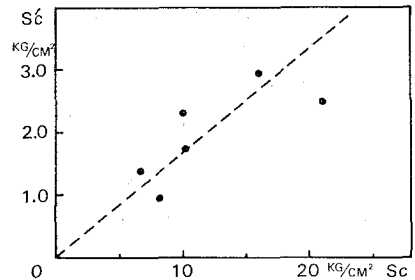


表-1 岩石試料試験結果

地 点	構 成 岩 石	整形試料による圧縮強度 (S_c)			非整形試料による圧縮強度 (S_c')			引 張 強 度 (S_t)		
		測 定 値 (kg/cm ²)	平均 値 (kg/cm ²)	試 料 数 (個)	測 定 値 (kg/cm ²)	平均 値 (kg/cm ²)	試 料 数 (個)	測 定 値 (kg/cm ²)	平均 値 (kg/cm ²)	試 料 数 (個)
1	凝 灰 質 砂 岩	3.61~7.91	6.11	8	1.09~1.95	1.39	10	0.95~5.24	2.33	9
2	凝 灰 質 砂 岩	5.42~15.7	8.10	4	0.48~1.66	0.970	10	0.48~1.01	0.66	4
3	泥 岩	17.5~33.3	23.9	8	1.02~4.39	2.48	10	1.13~5.09	2.43	9
4	泥 岩	7.80~10.6	9.67	8	0.22~5.44	2.30	10	0.75~1.79	1.10	9
5	泥 岩	12.7~18.1	16.0	3	1.92~4.14	2.96	10	—	—	—
6	泥 岩	6.59~12.5	10.2	9	1.33~2.85	1.75	10	0.79~1.69	1.28	9

係を示している。図中の点線は $S_c' = 0.17 S_c$ で表わされる。Protodyakonov は $S_c' \approx 0.19 S_c$ であると述べている。いずれにせよ割れ目を含んだ圧縮強度は割れ目がない場合の強度の 20% 程度のものになる。

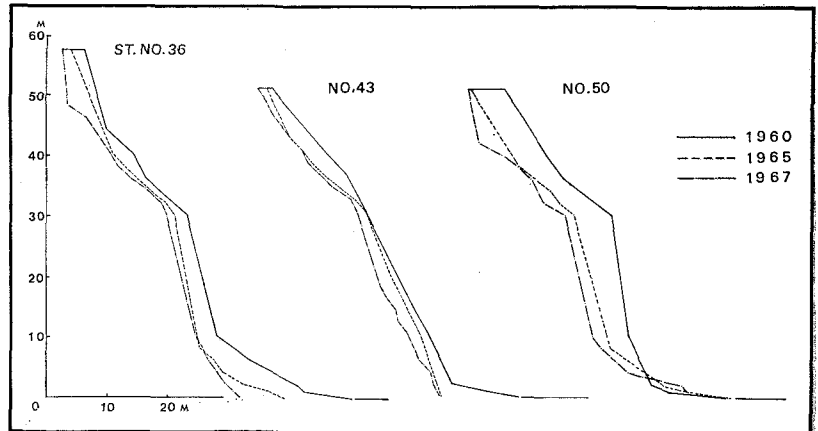
(3) 引張強度

岩石を直接引張ってその強度を求めることは困難であるので、ここでは圧裂引張試験法⁵⁾ による強度をもって引張強度とする。試料は直径約 5 cm、厚さ約 5 cm の円板であり、48 時間水中に浸したものを使用した。試験結果は表-1 に示されている。地点 5 については円板試料の作製が不可能であったため試験を行っていない。強度の平均値は凝灰質砂岩が $0.7 \sim 2.3 \text{ kg/cm}^2$ 、泥岩が $1.1 \sim 2.4 \text{ kg/cm}^2$ であり、両者の間には顕著な差はない。

5. 海蝕崖の侵蝕状況

調査地域に原則として 100 m 間隔で 91 の測点を設け (図-3)、そこでの崖のプロファイルの変化から侵蝕状況を調査した。崖のプロファイルは撮影年度の異なる航空写真を基にして図化された大縮尺 (1/1 000) の地形図から描いた。使用した航空写真は 1960 年 3 月 19 日、1965 年 12 月 25 日、1967 年 10 月 31 日および 1968 年 10 月 29 日に撮影されたものである。本来これらの写真は崖の侵蝕現象を捉えるという目的で撮影されたものではないため、撮影高度、撮影位置の関係で崖ののり面や基部が写っていない場合がある。1965 年の写真には調査地域全域が撮影されておらず、測点 1~68 の区間に限られる。また 1967 年の写真には測点 1~5 の区間が撮影されていないので、その区間に限り 1968 年撮影の写真を用いた。写真縮尺は 1960 年のものが約 1/12 000、他はすべて約 1/8 000 である。図化された地形図の縮尺はすべて 1/1 000 で、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。地形図の等高線間隔は原則として 2 m であるが、崖ののり面が急な所では 4~10 m である。

図-9 崖のプロファイルの変化



調査地域では、崖の侵蝕防止対策として異形ブロックを用いた消波堤の施工が実施されているが、1967 年の写真撮影時までに施工が完了している区間は測点 1~13, 87~91 である (図-3)。ここでは消波堤が施工されていない区間、すなわち測点 14~86 の区間、における侵蝕状況について詳述し、消波堤施工区間については後述する。

各測点における崖のプロファイルの変化を描き (図-9 にその一例を示す)、侵蝕断面積 S および侵蝕距離^{*} X を求めた。侵蝕距離としてはできる限り崖の基部での値を求めることが望ましいが、一般に基部は崩落物でおおわれている場合が多い。したがって、ここでは平均海面上 10 m 以下の高さでの侵蝕距離を上記のプロファイルから読み取り、年平均の侵蝕距離 (m/year) をもって侵蝕速度とした。

(1) 年平均放出土砂量の概算

測点 n および $n+1$ における断面積をそれぞれ S_n および S_{n+1} 、測点間の海岸線沿いの距離を L とすると、その間の土砂量 V は次式で与えられるものとする。

$$V = (S_n + S_{n+1}) \cdot L / 2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

式 (1) を用いて算出した結果を表-2 に示す。これによると 1960 年から 1967 年の間に崖の侵蝕に伴って海中に放出された年平均の土砂量は約 $300\,700 \text{ m}^3/\text{year}$ であり、それを海岸線 (崖の部分) の 1 km 当りの値に換算すると $41\,800 \text{ m}^3/\text{year}/\text{km}$ となる。なお参考までに太東岬 (図-1) における 1960 年から 1966 年の間における年平均放出土砂量は海岸線 1 km 当り $31\,000 \text{ m}^3/$

表-2 土砂量の計算結果

	期 間	使用測点	崖の部分の海岸線総延長	全放出土砂量	年平均放出土砂量	海岸線 1km 当り年平均放出土砂量
	years					$\text{m}^3/\text{year}/\text{km}$
1960 年 3 月 19 日~1965 年 12 月 25 日	5.75	14~50	3.6 km	676 510 m^3	117 900 m^3/year	32 800
1965 年 12 月 25 日~1967 年 10 月 31 日	1.83	14~50	3.6	314 470	172 000	47 800
1960 年 3 月 19 日~1967 年 10 月 31 日	7.58	14~86	7.2	2 279 460	300 700	41 800

* 海岸線に直角方向の水平距離をもって示す。

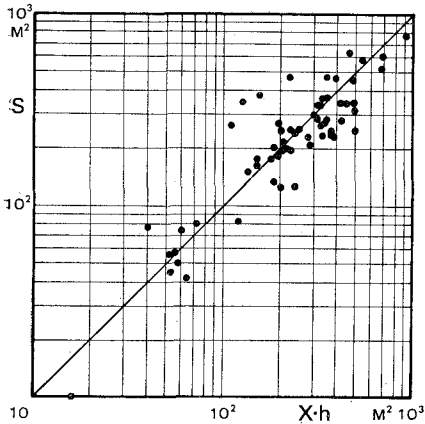
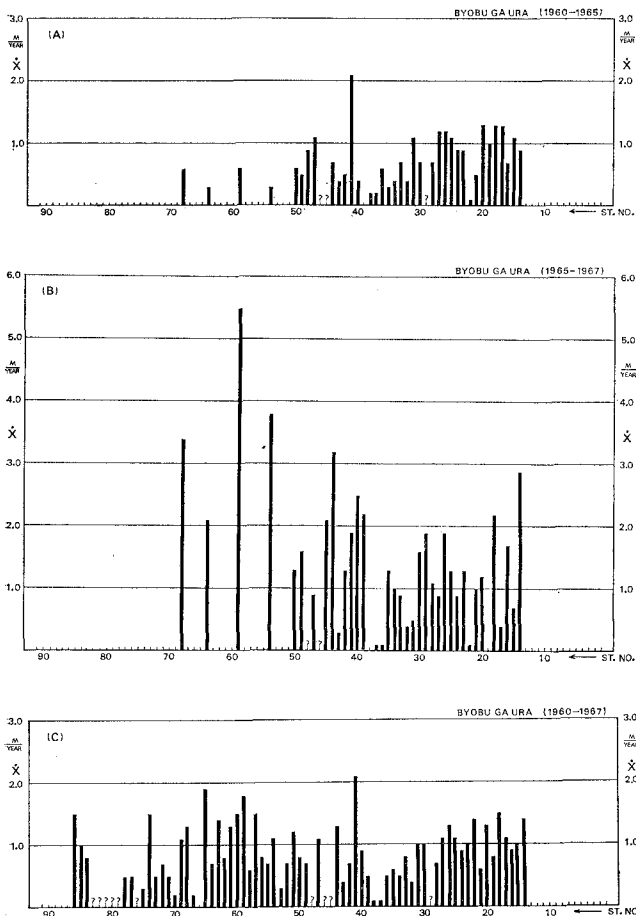
図-10 S と $X \cdot h$ との相関

図-11 侵蝕速度の場所的变化



year/km である⁶⁾。

1960 年から 1967 年の間の各測点における実測断面積 S と、崖ののり面が平行に後退していると仮定してその間の侵蝕距離 X と崖の高度 h の積 $X \cdot h$ との相関を図-10 に示す。これによるとかなり良い相関があるので式 (1) の代りに次式を用いて土砂量を求めてみる。

$$V' = (X_n \cdot h_n + X_{n+1} \cdot h_{n+1}) \cdot L/2 \dots \dots \dots (2)$$

ここに X_n , X_{n+1} はそれぞれ測点 n および $n+1$ における侵蝕距離, h_n , h_{n+1} はそれぞれ測点 n および $n+1$ における崖の高度である。計算の結果, 1960 年から 1967 年の間の年平均放出土砂量は, 海岸線 1 km 当り $37100 \text{ m}^3/\text{year/km}$ となり, 相対誤差は約 13% である。崖のプロファイルを描きそれを基にして断面積を求める

作業はかなり時間と労力を費やす。断面積を用いる代りに, 崖の基部における侵蝕距離と崖の高度との積を用いて土砂量を算出しても結果に大きな誤差はないものと考えられる。

(2) 侵蝕速度の場所的变化

図-11 に各期間における侵蝕速度 $\dot{X}$ の場所的变化を示す。図中 ? 印は崖の基部における崩落物の厚さが 10 m 以上あり, 基部における侵蝕速度を求めることが不可能であったことを示す。この図より各期間によって侵蝕速度の平均値もバラツキの程度も異なることがわかる。そこで各期間における侵蝕速度の平均値 $\bar{X}$, 標準偏差 σ , および変動係数 $\sigma/\bar{X}$ を求めたものを表-3 に掲げる。1960 年~1965 年, 1965 年~1967 年の 2 つの期間における侵蝕速度の平均値の相違は, 後述するように, 波浪の出現頻度のちがいによって説明できる。図-12 に侵蝕速度の変動係数 $\sigma/\bar{X}$ と期間 τ との関係を示す。図中の点線は福島県大熊海岸における資料⁷⁾を整理した結果である。この図によれば期間が長くなると変動係数は減少する。すなわち長期にわたって考えると, 崖は現在の海岸線とほぼ平行に後退していることがわかる。大熊海岸および本調査地域とも現在の海岸線は直線状であるので, 海岸線は直線を保ちつつ後退していることになる。したがってこのような様式で崖が後退している海岸においては, 局部的に侵蝕された場所のみ保護しても長期にわたって考えるとあまり意味があるとはいえない。

表-3

	期 間 τ	侵 蝕 距 離 の 平 均 値 $\bar{X}$	侵 蝕 速 度 の 平 均 値 $\bar{X}$	侵 蝕 速 度 の 標 準 偏 差 σ	侵 蝕 速 度 の 変 動 係 数 $\sigma/\bar{X}$
	years				
1960 年 3 月 19 日~1965 年 12 月 25 日	5.75	4.48 m	0.77 m/year	0.45 m/year	0.58
1965 年 12 月 25 日~1967 年 10 月 31 日	1.83	2.69	1.47	1.12	0.76
1960 年 3 月 19 日~1967 年 10 月 31 日	7.58	6.91	0.91	0.44	0.49

図-12 侵蝕速度の変動係数と期間との関係

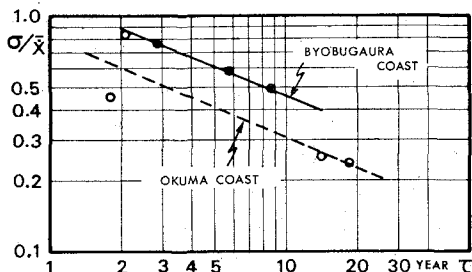
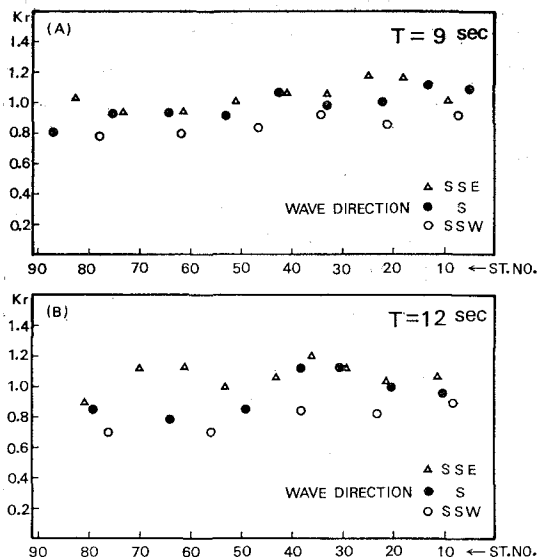


図-13 屈折係数の場所的变化



つぎに上述したような後退の原因を考える。ここで問題としている区間(測点 14~86)の崖の基部に露出する岩石は泥岩である(図-4)。非整形試料による泥岩の強度は各試料採取地点間でバラツキが多いが、平均値で考えるとほぼ同じとみなせる

(表-1)。機械的試験によって得られた岩石の強度によって波や流れに対する岩石の抵抗力を一義的に決定できるとは限らないが、ある程度その抵抗力を表現できると仮定するならば、この区間の崖の基部に露出する岩石の抵抗力は一定と考えてよい。崖基部における波の侵蝕力の場所的相違が屈折係数のそれによって表わされると仮定して、屈折係数 K_r の場所的变化を求めたものが図-13である。図-14 に周期 12 sec の場合の

屈折図を掲げる(紙面の関係で周期 9 sec のものは省略する)。図-13 より周期 12 sec, 9 sec の場合とも波向が SSE, S, SSW と変化するにつれて屈折係数が小さくなる傾向は見られるが、場所的变化は顕著ではない。岩石の抵抗力および波の侵蝕力の場所的变化が少ないことが上述の平行後退の原因であろう。

比較的短期間の侵蝕速度の場所的变化(図-11 (B))は、海底地形の変動(海底基盤の変動*ではない)、崖基部における海浜砂⁹⁾、および崩落物の有無などによって起こされる波の侵蝕力の局地的強弱によるものと考えられるが、定量的検討は行っていない。

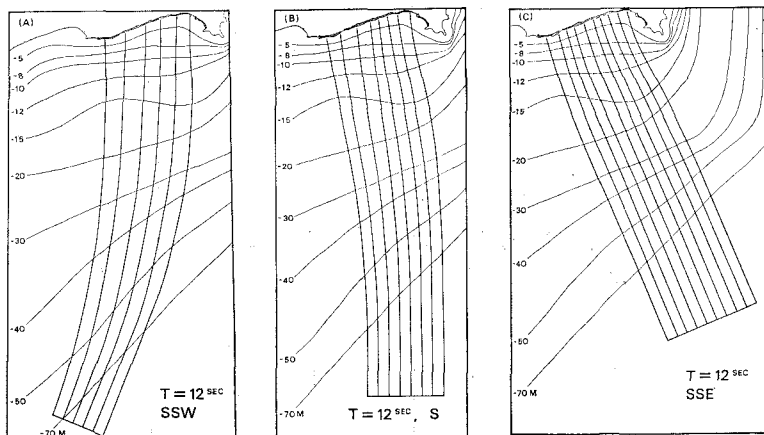
(3) 侵蝕速度と崖の高度との関係

従来、高度の大きい崖の侵蝕速度は低い崖のそれよりも小さいといわれている^{10), 11)}。すなわち低い崖は高い崖にくらべて早く後退するということである。崖基部での侵蝕距離が同じならば、高い崖は低い崖にくらべて崖上部から供給される崩落物の量が多くなり、それが運搬されない限り崖は侵蝕されないからであると考えられている。しかし福島県大熊海岸および本調査地域に関する限り、前述したように、長期間では崖は現在の海岸線とほぼ平行に後退しているのであるから、侵蝕速度と崖の高度とは無関係である。ちなみに 1960 年から 1967 年までの侵蝕速度 $\bar{x}$ と崖の高度 h との関係を図-15 に示す。この図からも全く関係のないことがわかる。長期にわたって考えると崩落物の量の多少は侵蝕速度に影響をおよぼさないと考えてよい。

(4) 侵蝕限界波高の推定

崖の侵蝕を引き起こす限界の波高を侵蝕限界波高と呼ぶことにし、その推定を試みる。図-16 は平面水槽を用いて行なった崖の侵蝕に関する実験¹²⁾の結果を無次元表示したものである。図中 w は水の単位体積重量、 H

図-14 屈折図



* 海底基盤の変動速度は非常に小さいので無視できる。福島県大熊海岸においては崖基部における海底基盤の垂直変動速度は、崖の侵蝕速度の約 1/60 である⁹⁾。

図-15 侵蝕速度と崖の高度との関係

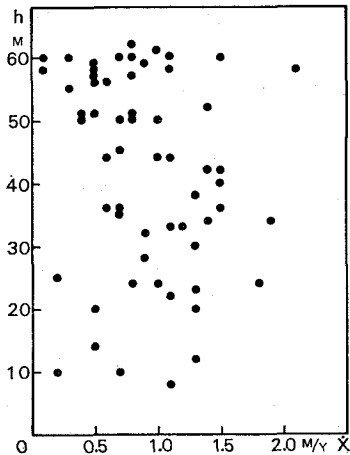
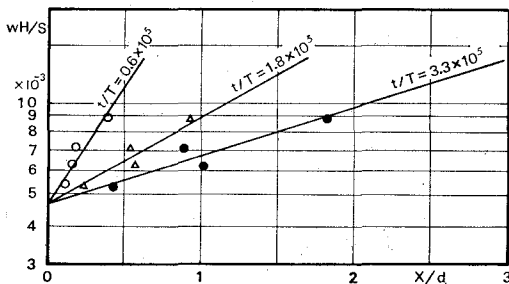
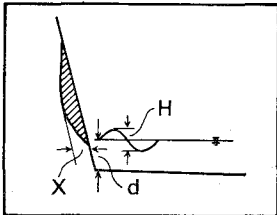
図-16 wH/S と X/d との関係

図-17



は崖の基部における波高、 S は崖を構成する材料の圧縮強度、 X は侵蝕距離、 d は崖の基部における水深、 t は波の作用時間、 T は波の周期である (図-17)。図-16中の直線は次式で表わされる。

$$wH/S = 4.65 \times 10^{-3} e^{\beta X/d} \quad (3)$$

ここに β は t/T の関数である。つぎに β と t/T の関係を求めてみると 図-18 のようになる。図中の曲線は次式で表わされる。

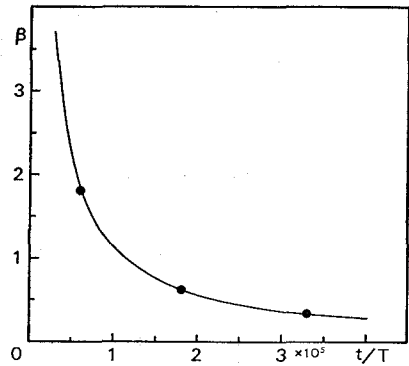
$$\beta = 1.13 \times 10^5 / (t/T) \quad (4)$$

式 (3)、(4) より次式を得る。

$$X/d = 8.85 \times 10^{-5} \{5.36 + \ln(wH/S)\} t/T \quad (5)$$

相似則、実験条件* 等の問題があるので式 (5) をその

* 参考までに実験条件を示しておく。模型縮尺 1/25, $S=0.34$ kg/cm² (高さ 10 cm, 直径 5 cm の円柱形試料による強度), $H=1.8\sim3.0$ cm, $d=2.8$ cm, $t=0\sim109$ hrs, $T=1.2$ sec. Froude の相似則が適用できるものとして現地の値に換算してみると, $S=8.5$ kg/cm², $H=0.45\sim0.75$ m, $d=0.7$ m, $t=0\sim545$ hrs, $T=6.0$ sec となる。

図-18 β と t/T との関係

まま現地に適用できない。ここでは崖の侵蝕現象が次式で示されるものと考えて現地の資料により定数を決定する。

$$X/d = r \{C + \ln(wH/S)\} t/T \quad (6)$$

ここに r, C は定数である。

一般に崖の侵蝕の激しい地域では、崖の基部における水深は非常に浅い。顕著な侵蝕が行なわれるのは潮位が高い時であると考えられる。本調査地域においては潮位が H.W.L. 付近にある時に侵蝕が行なわれると考えて、以下海面を H.W.L. に固定する。すなわち $d=\text{const.}$ とする。また崖の基部での岩石の強度も時間的変化がないと仮定して $S=\text{const.}$ とする。ある期間に襲来した波浪を n 個の階級にわけて考える。崖の基部における波高を H_i , 周期を T_i とし、その波浪が作用した時間を t_i , その時の侵蝕距離を X_i とすると式 (6) より、

$$X_i/d = r \{C + \ln(wH_i/S)\} t_i/T_i \quad (7)$$

となる。したがってある期間 I の侵蝕距離 X は

$$X/d = \sum_{i=1}^n (X_i/d) = r \left\{ C \sum_{i=1}^n (t_i/T_i) + \sum_{i=1}^n (t_i/T_i) \cdot \ln(wH_i/S) \right\} \quad (8)$$

となり、ここで $X/d=A_I$, $\sum (t_i/T_i)=J_I$, $\sum (t_i/T_i) \cdot \ln(wH_i/S)=K_I$ とおくと、式 (8) はつぎのようになる。

$$A_I = r(CJ_I + K_I) \quad (9)$$

同様に、他の期間 II においては、

$$A_{II} = r(CJ_{II} + K_{II}) \quad (10)$$

となる。式 (9)、(10) より

$$r = (A_I J_{II} - A_{II} J_I) / (K_I J_{II} - K_{II} J_I) \quad (11)$$

$$C = (A_{II} K_I - A_I K_{II}) / (A_I J_{II} - A_{II} J_I) \quad (12)$$

1960 年～1965 年, 1965 年～1967 年の 2 つの期間について考える。それぞれの期間における侵蝕距離 X は表-3 より 4.5 m および 2.7 m である。崖の基部における水深 d は海浜堆積物の厚さを無視すると $d=1.4$ m となる。崖を構成する岩石の強度は、割れ目を含んだ強度を採用することにする。泥岩の非整形試料による

表—4 富崎における波高の出現頻度 δ

観測 波高 H_s (m)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
期 間						
1960 年 3 月 19 日 ~ 1965 年 12 月 25 日	36.8%	45.1%	9.7%	4.4%	3.6%	0.4%
1965 年 12 月 25 日 ~ 1965 年 10 月 31 日	18.2	62.4	10.2	4.0	3.4	1.8

表—5 崖基部における波浪特性

観 測 波 高 H_s	沖 波 の 特 性		崖基部における特性	
	波 H_0 高	周 T_0 期	波 H 高	周 T 期
5.5 m	5.1 m	11.3 sec	1.2 m	9.7 sec
4.5	4.2	11.3	1.4	8.8
3.5	3.3	10.5	1.5	9.7
2.5	2.4	10.2	1.1	9.2
1.5	1.5	9.6	1.3	9.6
0.5	0.5	8.4	0.7	8.4

圧縮強度の平均値 (表—1) を平均したものを用いる。すなわち $S=2.4 \text{ kg/cm}^2$ とする。前述したように名洗港における波浪観測資料は欠測期間も多く、また 1964 年までのものであるため、ここでは富崎 (図—1) における目視観測の資料を整理した結果¹³⁾ (表—4) を用いることにする。富崎で観測された波高が名洗港において水圧式波高計によって観測された有義波高に等しいものと仮定して、図—6 中の直線より周期を求め、波高計設置水深を考慮して沖波波高を推定*し、中村・白石・佐々木の方法¹⁴⁾ を用いて崖の基部における波高と周期を推算した (表—5)。なお砕波による水位上昇量および崖からの反射波の影響は無視した。表—6 に $A_I, J_I, K_I, A_{II}, J_{II}, K_{II}$ の計算結果を示す。表中 δ は波高の出現頻度を示し、表—4 の値である。なおここでは波の作用時間 t は、期間 τ と δ との積で表わされるものと考えた。 $A_I, J_I, K_I, A_{II}, J_{II}, K_{II}$ を式 (11), (12) に代入して r, C を求めると $r=1.12 \times 10^{-6}$, $C=3.33$ となり、式 (6) は次式で示される。

$$X/d = 1.12 \times 10^{-6} \{3.33 + \ln(wH/S)\} t/T \dots (13)$$

$X/d \geq 0, t/T \geq 0$ でなければならないから、

$$3.33 + \ln(wH/S) \geq 0 \dots (14)$$

式 (14) に $w=1.0 (\text{t/m}^3)$, $S=24 (\text{t/m}^2)$ を代入すると、

$$H \geq 0.86 (\text{m}) \dots (15)$$

を得る。したがって崖の基部における侵蝕限界波高は約 0.9 m となる。上述の計算過程に入ってくる波の作用時間 t としては、海面が H.W.L. 付近にある時間を採用しなければならないが、日潮不等、一日一回潮、あるいは気圧低下や吹きよせによる異常潮位などの影響で厳密にその時間を求めることはむずかしい。いま、海面が H.W.L. 付近にある時間を、単純に考えて、全体の期間の $1/p$ であるとする、海面が H.W.L. 付近にある時の波の作用時間は t/p となる。式 (11), (12) 中の J_I, J_{II}, K_I, K_{II} に $J_I/p, J_{II}/p, K_I/p, K_{II}/p$ を代入すると、

$$\begin{aligned} r' &= (A_I \cdot J_{II}/p - A_{II} \cdot J_I/p) / (K_I/p \cdot J_{II}/p \\ &\quad - K_{II}/p \cdot J_I/p) = p(A_I J_{II} - A_{II} J_I) / \\ &\quad (K_I J_{II} - K_{II} J_I) = p r \dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C' &= (A_{II} \cdot K_I/p - A_I \cdot K_{II}/p) / (A_I \cdot J_{II}/p \\ &\quad - A_{II} \cdot J_I/p) = (A_{II} K_I - A_I K_{II}) / \\ &\quad (A_I J_{II} - A_{II} J_I) = C \dots (17) \end{aligned}$$

p は r に影響を与えるが、 C には無関係である。したがって式 (15) の結果はほぼ妥当なものであると考えられる。

(5) 侵蝕速度と波浪の出現頻度との関係

1960 年~1965 年の侵蝕速度の平均値は 0.8 m/year であり 1965 年~1967 年のそれは 1.5 m/year である (表—3)。上述の計算結果より崖基部における侵蝕限界波高は約 0.9 m であり、観測波高で考えると約 1.5 m となる (表—5)。本調査地域の崖基部における水深は非常に浅くまた海底勾配もゆるい (1/100~1/200) ために、観測波高 1.5 m 以上の波は崖基部においてほぼ同じような特性を持つ (表—5)。したがって各期間における観測波高 1.5 m 以上の出現頻度の相違が侵蝕速度に影響をおよぼすものと考えられる。そこで表—4 より 1.5 m

表—6 計 算 結 果

期 間 I (1960 年 3 月 19 日~1965 年 12 月 25 日) $\tau=5.75 \text{ years}, X=4.5 \text{ m}$							期 間 II (1965 年 12 月 25 日~1967 年 10 月 31 日) $\tau=1.83 \text{ years}, X=2.7 \text{ m}$						
H_s	δ	H	T	$t (= \tau \delta)$	t/T	$(t/T) \ln(wH/S)$	H_s	δ	H	T	$t (= \tau \delta)$	t/T	$(t/T) \ln(wH/S)$
m	%	m	sec				m	%	m	sec			
5.5	0.4	1.2	9.7	7.28×10^5	7.50×10^4	-2.25×10^5	5.5	1.8	1.2	9.7	1.05×10^6	1.08×10^5	-3.24×10^5
4.5	3.6	1.4	8.8	1.30×10^6	1.48×10^5	-4.22×10^5	4.5	3.4	1.4	8.8	1.98×10^6	2.25×10^5	-6.41×10^5
3.5	4.4	1.5	9.7	8.01×10^5	8.26×10^5	-2.29×10^6	3.5	4.0	1.5	9.7	2.33×10^6	2.40×10^5	-6.65×10^5
2.5	9.7	1.1	9.2	1.77×10^7	1.92×10^6	-5.89×10^6	2.5	10.2	1.1	9.2	5.94×10^6	6.46×10^5	-1.98×10^6
1.5	45.1	1.3	9.6	8.21×10^7	8.55×10^6	-2.50×10^7	1.5	64.4	1.3	9.6	3.63×10^7	3.78×10^6	-1.10×10^7
0.5	36.8	0.7	8.4	6.70×10^7	7.98×10^6	-2.82×10^7	0.5	18.2	0.7	8.4	1.06×10^7	1.26×10^6	-4.46×10^6
$A_I = X/d = 3.20$							$A_{II} = X/d = 1.92$						
$J_I = \sum (t/T) = 1.95 \times 10^7$							$J_{II} = \sum (t/T) = 6.26 \times 10^6$						
$K_I = \sum (t/T) \ln(wH/S) = -6.20 \times 10^7$							$K_{II} = \sum (t/T) \ln(wH/S) = -1.91 \times 10^7$						

* 浅水度係数のみを考慮した。

以上の波高の出現頻度を求めてみると1960年～1965年が63.2%, 1965年～1967年が81.8%となり, この出現頻度の相違が侵蝕速度に相違をもたらしたのである。

6. 消波堤の効果

1965年12月の航空写真撮影時までに消波堤の施工が完了している区間は測点1～5の区間にすぎない。この区間の消波堤の天端高は平均海面上約1.5m, 天端幅は約3mである。ここでは崖のプロファイル(図-19に一例を示す)を基にして, 施工完了後の1965年12月から1968年10月までの2.83年間の崖の変化を観察して消波堤の効果を検討する。図-19に示すように崖の基部はほとんど変化しておらず, 崖の基部は波の侵蝕からまぬがれていると考えられる。なお崖の上部およびり面に変化が見られるが, これは降雨の影響によるのみならず人工によるものである。資料不足のため消波堤の効果を定量的に表現することは行っていない。

7. 結 語

(1) 海蝕崖の侵蝕速度は1960年から1967年の間では約0.9m/yearで, その間崖の侵蝕に伴って海中に放出された年平均の土砂量は, 海岸線1km当り, 41800m³/year/kmとなる。

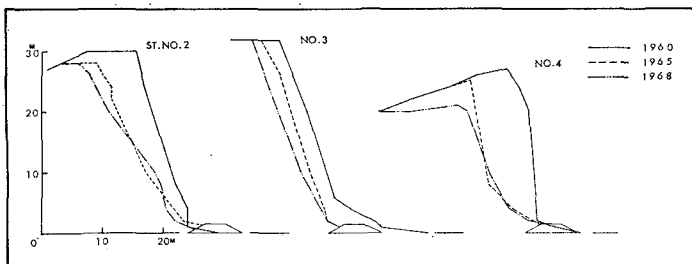
(2) 長期にわたって考えると, 崖は現在の海岸線とほぼ平行に後退しており, 侵蝕速度は崖の高度と無関係である。

(3) 崖の基部における侵蝕限界波高は約0.9mである。

(4) 一部の地域で施工されている消波堤は有効であると考えられるが, 資料不足のためその効果を定量的に表現するまでには至らなかった。

最後に, 本研究をなすに当りお世話になった千葉県土木部河港課, 同銚子土木事務所, および(株)I.N.A.新土木研究所の皆様に記して謝意を表する。なお本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

図-19 消波堤施工完了区間における崖のプロファイルの変化



する。

参 考 文 献

- 1) 川崎逸郎：千葉県飯岡町附近の地形, 地理評, 27, pp. 213-217, 1954.
- 2) 運輸省第二港湾建設局・横浜調査設計事務所・千葉港工事事務所：名洗港波浪整理台帳, 1967.
- 3) 山口梅太郎・西松裕一：岩石力学入門, p. 154, 東京大学出版会, 1967.
- 4) Protodyakonov, M.M. : New Methods of Determining Mechanical Properties of Rocks, Int. Conf. on Strata Control, pp. 187-195, 1960.
- 5) 前掲 3), p. 124.
- 6) 堀川清司・砂村継夫：航空写真による海蝕崖の後退に関する研究, 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 187-195, 1960.
- 7) Horikawa, K. and T. Sunamura : A Study on Erosion of Coastal Cliffs by Using Aerial Photographs, Coastal Eng. in Japan, Vol. 10, pp. 69-83, 1967.
- 8) Sunamura, T. : Erosion of Coastal Cliffs and of Submarine Bedrocks, 東京大学工学部土木工学科論文集録, 6, pp. 179-184, 1969.
- 9) 堀川清司・砂村継夫：海蝕崖の侵蝕に関する実験的研究, 第15回海岸工学講演会講演集, pp. 149-157, 1968.
- 10) Shepard, F.P. and U.S. Grant : Wave Erosion along the Southern California Coast, Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 58, pp. 919-926, 1947.
- 11) 前掲 1).
- 12) Horikawa, K. and T. Sunamura : An Experimental Study on Erosion of Coastal Cliffs Due to Wave Action, Coastal Engg. in Japan, Vol. 11, pp. 131-147, 1968.
- 13) 東京大学工学部土木工学科港湾研究室：屏風ヶ浦および太東岬海岸侵蝕調査報告書, pp. 73-74, 1964.
- 14) 中村充・白石英彦・佐々木泰雄：砕波による水理特性, 第15回海岸工学講演会講演集, pp. 30-35, 1968.