

可動物質海岸の平面形状の変化と安定

真 嶋 恭 雄*

1. 概 説

一般に海岸には岬、岩礁が点在し、その間に砂、砂利など波により移動されやすい物質よりなる砂浜、砂利浜がつらなっている。岬、岩礁を固定点とすると固定点の間に可動物質がその地域の波の作用に応じて移動し、しだいに落ちていた形になる。この形状は海岸線に直角方向の断面形状と、水際線で代表される平面形状にわけられるが相互に密接な関係がある。すなわち断面において堆積が多ければ水際線が前進し平面形状は変化する。

海岸物質を移動させる波の持っているエネルギーと漂砂移動量とは密接な関係がある^{1),2)}。波はその地域の風速、風向とその継続時間によって発達し海岸に到達するので海岸地形を考える場合、その海岸地域の長年月にわたる風の状態を知ることが重要である。さらに海岸物質には微細な砂から玉石、転石まで大小があり、その比重も軽石から鉄鉱石のような重いものまで種々混在している。これらの風、波、海岸物質、固定点（岩石地形）によって海岸の可動物質海岸の形状が支配されと考えられる。海岸のこの性質については定性的に、および、なかば定量的に検討し前に報告した^{3),4),5),6),7)}。ここでは波の方向が決まると、ある期間後には海岸線が波の進行方向に対して直角な直線になることを考えに入れ、風の状態より波の状態を求め、波のエネルギーにより生ずる海岸平面形状を表わす微分方程式を導き、これに適当な境界条件を適用し電子計算機で海岸形状を求めるとともにその計算結果より現海岸の特性と安定性を推定する方法をのべることにする。

2. 海岸の平面形状理論式

海岸地形に関係のある基本量として次のものが考えられる。

- R : 海岸平面形の曲率半径, デイメンション $[L]$
- l : 固定点間の距離 $[L]$
- h : 湾内平均水深 $[L]$
- g : 重力加速度 $[LT^{-2}]$
- d_{50} : 海岸物質平均粒径 $[L]$
- ρ : 海水密度 $[ML^{-3}]$

- σ : 海岸物質の密度 $[ML^{-3}]$
- μ : 海水粘性係数 $[ML^{-1}T^{-1}]$
- E : 海岸に到達する波浪エネルギー $[ML^2T^{-2}]$
- i : 海底勾配
- K : 波浪減衰係数
- ε : 海岸物質移動に消費される波のエネルギーの割合

これらの基本量により海岸形状の変形が行なわれると考える。 i, K, ε は無次元量で定数に含めて考え、残りの9個の基本量について次元解析を行なうと海岸変形の物理現象は

$$f_0\left(\frac{R}{l}, \frac{h}{l}, \frac{h}{d_{50}}, \frac{\sigma}{\rho}, \frac{E}{goh^4}, \frac{gd_{50}^3}{v^2}\right)=0 \cdots (1)$$

$$\text{ただし, } v=\frac{\mu}{\rho}$$

によって表わされると考えられる。書き替えると

$$\frac{R}{l}=f_1\left(\frac{h}{l}, \frac{h}{d_{50}}, \frac{\sigma}{\rho}, \frac{E}{goh^4}, \frac{gd_{50}^3}{v^2}\right) \cdots \cdots (2)$$

R/l が5個の無次元量の関係式で表わされるが変形の結果について考え、変形の過程は考えないものとする。式(2)はきわめて複雑で多くの未解決の問題を含んでいる。ここでは波のエネルギーが大きいときはその海岸の曲率半径は大きいと仮定し、その比例定数にその他の無次元量を含めるものとする。すなわち

$$R=CE \text{ (C: 比例定数)} \cdots \cdots (3)$$

式(2)と比べて

$$C=\frac{l}{goh^4}f_2\left(\frac{h}{l}, \frac{h}{d_{50}}, \frac{\sigma}{\rho}, \frac{gd_{50}^3}{v^2}\right) \cdots \cdots (4)$$

任意の平面曲線

$$y=f(x) \cdots \cdots (5)$$

において曲率半径 R は

$$R=\frac{\left\{1+\left(\frac{df}{dx}\right)^2\right\}^{3/2}}{\frac{d^2f}{dx^2}} \cdots \cdots (6)$$

図一1の P_1, P_2 を相隣る2つの固定点としその中点を原点にとり、 P_1P_2 を x 軸、 $+y$ 軸方向を沖方向とする。 $P(x, y)$ を海岸曲線上の1点とし、この点における接線方向を x 軸に対して Φ とする。この点に至るエネルギーの方向を x 軸に対して δ とし、海岸線がエネルギーに対して直角になるためには

* 正会員 防衛大学校教授 土木工学教室

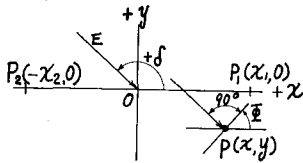


図-1

$$\frac{dy}{dx} = \tan \phi = \tan \left(\delta - \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{1}{\tan \delta} \quad \dots\dots (7)$$

これを

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{\tan \delta} = \phi(x, y) \quad \dots\dots (8)$$

とおき式(6)に代入すると

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{d\phi}{dx} = \frac{(1+\phi^2)^{3/2}}{R} \quad \dots\dots (9)$$

x, y 座標を固定点間の距離 l にて除して無次元表示にする。式(3)の R を(9)に入れると

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{l}{CE} (1+\phi^2)^{3/2} \quad \dots\dots (10)$$

$$\frac{l}{C} = n \quad \text{とおく} \quad \dots\dots (11)$$

したがって、

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{n}{E} (1+\phi^2)^{3/2} \quad \dots\dots (12)$$

任意の点 $P(x, y)$ に到達する波のエネルギーの大きさ E と方向 δ が x, y の関数として与えられ、適当な境界条件に対して式(8), (12)を解けば海岸の平面形が得られる。

3. 海岸線上の波のエネルギーとその方向

直線 $P_1 P_2$ の中点(図-2)における沖波がそのまま

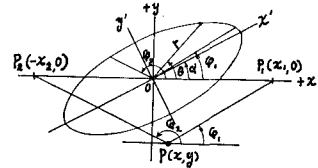


図-2

海岸線上の1点 P に到達する波のエネルギーは PP_1, PP_2 に平行に楕円の中心より引いた2つの方向線にはさまれた面積で表わされる。

A : 波エネルギー楕円の長半径, B : 楕円の短半径

α : 楕円の長軸の x 軸からの角度(逆時計針方向を+とす), $P_1(x_1, 0), P_2(-x_2, 0)$: 固定点, φ_1, φ_2 : PP_1, PP_2 と x 軸とのなす角で図のようにとる。 E : P 点に至る波のエネルギーで φ_2, φ_1 の間の楕円の面積, δ : P に至る波のエネルギーの合成方向で x 軸から逆時計方向を正にとる。計算の結果は

$$E = \frac{\sqrt{1-k^2}}{2k} A^2 \sqrt{\left[\tan^{-1} \left\{ \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \sin(\varphi_2 - \alpha) \right\} - \tan^{-1} \left\{ \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \sin(\varphi_1 - \alpha) \right\} \right]^2 + \frac{1-k^2}{4} \left[\log \frac{1-k \cos(\varphi_2 - \alpha)}{1+k \cos(\varphi_2 - \alpha)} - \log \frac{1+k \cos(\varphi_1 - \alpha)}{1-k \cos(\varphi_1 - \alpha)} \right]^2} \quad \dots\dots (13)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} k^2 &= 1 - \frac{B^2}{A^2} & x_1 &= x_2 = 0.5 \\ \varphi_2 &= \tan^{-1} \frac{y}{x+x_2} & \varphi_1 &= \tan^{-1} \frac{-y}{x_1-x} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (14)$$

式(13)の平方根内の第1項を K_1^2 , 第2項を K_2^2 とおくと

$$E = \frac{\sqrt{1-k^2}}{2k} A^2 \sqrt{K_1^2 + K_2^2} \quad \dots\dots (15)$$

$$\tan \delta = \frac{K_1 \sin \alpha + K_2 \cos \alpha}{K_1 \cos \alpha - K_2 \sin \alpha} \quad \dots\dots (16)$$

波エネルギー分布図が半径 r の円で表わされるときは

$$E = \frac{r^2}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad \dots\dots (17)$$

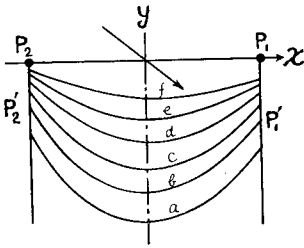
$$\tan \delta = \frac{-\cos \varphi_2 + \cos \varphi_1}{\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1} \quad \dots\dots (18)$$

4. 海岸形状方程式の境界条件

海岸の基本形状は長年にわたる強風による波のために生ずる変形の累積結果として形成される。したがって波エネルギー図を用いて海岸の基本形状を計算することができると考えられるが一時的にはそのときの強い波のため、その波の方向に対して不安定な部分は大きい変形を生じ、その波に対して安定な部分は変形しない。長年間に変形しない部分があればその位置を固定点と考えることができる。

岩礁よりなる岬は固定点であるが可動物質海岸の部分でも海岸位置の変わらない所として考えられるものは

1) 急流河川の河口付近, 海岸物質に比して河より運ばれた玉石, 岩石などは移動抵抗が大きく、普通の波に



図—3

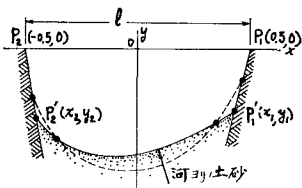
対しては固定点となるが特に強い大波では侵食移動を生ずる。

2) 固定点取付部、岬などの固定点と内陸部との間が岩石地質より成っているとき、または突堤のように海岸より突出している場合、海岸への流出土砂があれば湾奥の海岸線は前進する(図—3)。湾奥では波の作用も弱く図の a, b, c のように前進するが固定点付近では、その海岸に平行な波のエネルギー成分のためしだいに前進を妨げられ海岸物質が陸側へ押しもどされるようになる。

このときの海岸線の岩石部との交点 P_1, P_2 は海岸曲線の終点であると考えられる。流出土砂量と、その成分によって海岸線の前進の程度は変わるが P_1, P_2 の位置は波の状態によってほぼ決まる。

3) 隣接海岸より漂砂流入のある場合、固定点付近の波の状態と漂砂量に応じて固定点付近に砂州が発達し、平衡状態に達したとき、固定点の作用をなし海岸線の境界点となると考えられる。砂州を生ずる場合は湾口を狭め渦を生じ、外海に面した海岸は固定点間に波に応じた海岸地形ができるが砂州が発達しないときは隣接海岸よりの漂砂は固定点を回って湾内に流入し湾内の海岸を前進させ、または湾内の水深を減少させる。

4) 海岸物質の性質による境界の変化、海岸物質は内陸よりの流入土砂または海岸の侵食土砂より成るがその粒径、比重によって波の作用は異なり、移動しやすいものはその場にとどまり、移動しやすいものは運び去られ、その波に応じた海岸物質となる。図—4 の P_1, P_2 の位置は粗大で重いものは P_1, P_2 に近く、微細で軽いものは離れて、それぞれに応じた海岸形を形成するものと考えられる。また波の状態が変化すれば P_1, P_2 の位置は変わ



図—4

るが長年の間には、その平均位置はほぼ一定になると考えられる。

5) 侵食海岸の境界、固定点となる岩石がないとき、または軟弱岩より成る海岸は波の侵食を受けしだいに後退する。侵食が進行して固い岩石が露出するに至れば固定点となる。一端にのみ固定を生じたときに固定点間距離がきわめて大きいときの半分の海岸の状態となり、一端は固定点に支配され他端は後退する。

5. 波エネルギー分布図による海岸形状

式 (12) の E は式 (13) または式 (17) に見られるように定数と x, y の関数の積の形になっているので定数部を n に入れ、波エネルギー分布図が楕円で表わされるときは

$$n_e = \frac{2lk}{C\sqrt{1-k^2}A^2} \dots\dots\dots (19)$$

円形のときは

$$n_c = \frac{4l}{r^2C} \dots\dots\dots (20)$$

とおく。 n_e, n_c を海岸の平面形の形状係数と名付ける。

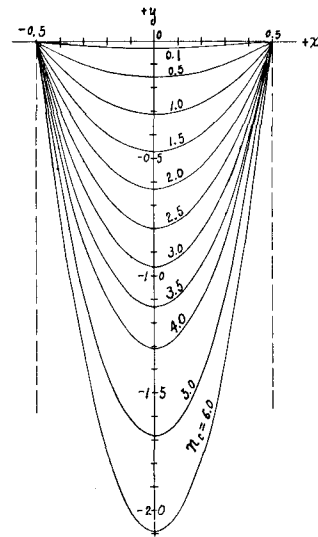
式 (12) は楕円エネルギー分布に対しては

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d\phi}{dx} = n_e \frac{(1+\phi^2)^{3/2}}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} \dots\dots\dots (21)$$

円形分布に対しては

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d\phi}{dx} = n_c \frac{1 - \cos(\phi_2 - \phi_1)}{(\cos \phi_2 - \cos \phi_1)^3} \dots\dots\dots (22)$$

となる。これらの微分方程式を式 (8) とともに、楕円に対しては式 (13), (14), (15), (16) を用い、円形に対しては式 (17), (18) を用いて、適当な境界条件を与えて解けば海岸形が求められる。



図—5

(1) 円形エネルギー分布による海岸平面形状

式 (22) を両端が固定点を通る条件で逐次数値計算⁹⁾により 1/10 000 以下の精度で電子計算機で解いた結果は図-5 である。この海岸形状は固定点を結ぶ直線部分に外海より到達する波がそのまま湾内に進入したと仮定した場合の安定形であるので、湾奥が深いときは湾内の波のエネルギーが進入エネルギーより大きくなり海岸形は湾内波に支配される。したがって湾奥が深いときは別に考えなければならない。

(2) 楕円エネルギー分布による海岸平面形状

式 (21) において楕円長軸の x 軸に対する角 α , 離心率 k , 形状係数 n_e , および固定点付近の海岸形の始点, 終点を適当に与えて逐次数値計算⁹⁾を電子計算機により行なって得られた海岸形の例を図-6, 7 に示す。これらは図-5 と同様に形状係数が大となると湾入が深くなり, α が 90° より小さいと左右非対称になる。また B/A が小さいほど k は 1 に近づき図-8 のように同じ α と n_e に対して変化する。

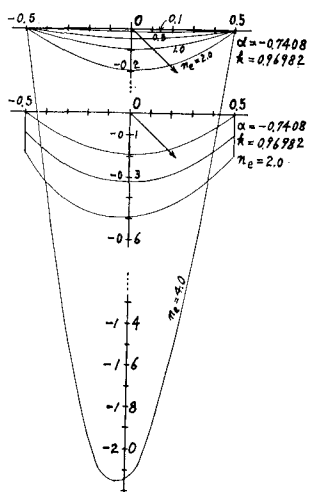


図-6

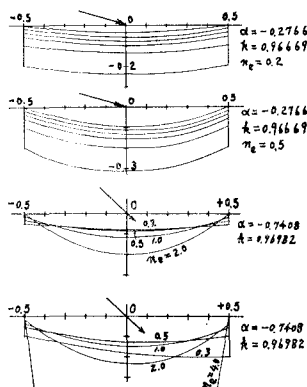


図-7

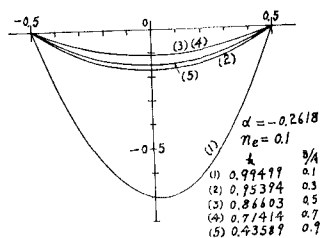


図-8

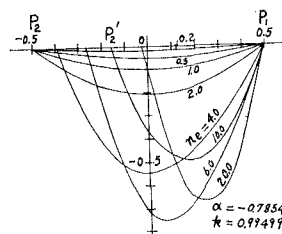


図-9

また固定点を通る海岸線で他端の固定点を通るためには α, k に制限がある。(図-9)。図-9 のように他端はきわめて不安定で $P_2P'_2$ の間は沿岸漂砂があれば堆積しやすく砂州の伸びやすい所であると思われる。このような状態を生ずるのは n_e の大きいときで図-10 の関係がある。波が弱く l が非常に大きい場合 n_e が大きくなり, 維持できる湾口は小さくなる。ただし湾口の幅が潮流などに支配されるような場合は別に考えなければならない。

6. 実際海岸の諸性質

(1) 波のエネルギー年間分布図

$H_{1/8}$: 有義波高 (m)

L : 波長 (m)

H_m : 平均波高 (m)

$T_{1/3}$: 有義波の周期 (sec)

T_m : 平均波の周期 (sec)

t_d : 風の継続時間 (h_r)

U : 風速 (m/sec)

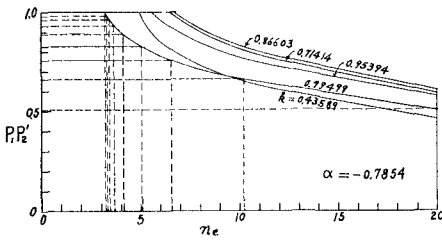
E_w : 波のエネルギー (Ton m/m)

$$\left. \begin{aligned} H_m &\div 0.64 H_{1/8} \\ T_m &\div 0.64 T_{1/3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

と仮定し, 一つの風向で生じた波がその風の吹いている間継続すると考えてその波のエネルギー E_w は

$$\begin{aligned} E_w &= \frac{\rho g H_m^2 L t_d}{8 T_m} = \frac{0.64^2 H_{1/8}^2 L t_d \times 3600}{8 \times 0.64 T_{1/3}} \\ &= 288 \frac{H_{1/8}^2 L t_d}{T_{1/3}} \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

沖波の波長 $L = \frac{g T^2}{2\pi}$ を用いて



図—10

$$E_w = 288 \frac{g}{2\pi} (0.64 T_{1/3})^2 \frac{H_{1/3}^2 t_d}{T_{1/3}} \quad (25)$$

$$= 184 H_{1/3}^2 t_d T_{1/3} \dots\dots\dots (25)$$

ただし上式の係数 184 は年間の波の平均状態より求めるべきもので各海岸についての波の観測値が不十分であるため仮に採用した値である。年間の波のエネルギー分布図は次の順序で行なう。

- 1) 海岸に近い気象台の毎時の風向、風速より同一風向の継続時間とその間の平均風速を風向別に計算する。
- 2) 上記の平均風速 5 m/sec 以上の風を取り出し外海の Fetch として

$$F = 3.6 t_d U (\text{km}) \dots\dots\dots (36)$$

を用い、全方位に陸岸がないものと仮定して平均風速 U と F を S.M.B. の図⁹⁾ に適用して $T_{1/3}$ および $H_{1/3}$ を求める。

- 3) $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ を式 (25) に入れて E_w を求め風向別月ごと、季節ごとおよび全年の合計値を計算する。風向観測は便宜上 16 方位に分けて行なっているが実際上 $2\pi/16 = \pi/8$ の角度内に分布している。したがって波エネルギーも $\pi/8$ の角度を頂角とする扇形の面積にて表わされることになる。

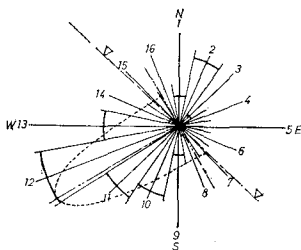
$$E_w = \int_{\theta_1}^{\theta_1 + \pi/8} \frac{1}{2} d\theta = \frac{\pi}{16} r^2$$

ゆえに扇形の半径 r は

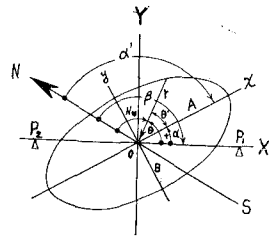
$$r = \sqrt{\frac{16}{\pi} E_w} = 2.256756 \sqrt{E_w} \dots\dots\dots (27)$$

風向別 r を式 (27) より計算して方位線上に記入して図—11 の波エネルギー分布図が得られる。

(2) 波エネルギー楕円



図—11



図—12

図—12 のように α : 波エネルギー楕円の長軸と X 軸との角, α' : 長軸の方向角, β : 海岸にて海に向かって右固定点方向 OP_1 の方向角, N_w : 任意の風向の方向角, θ : 風向と OX 軸との角, θ' : 風向と長軸とのなす角とすると

$$\begin{aligned} \theta &= \beta - N_w \\ \alpha' &= \beta - \alpha \\ \theta' &= \theta - \alpha \\ &= \alpha' - N_w \\ &= \beta - N_w - \alpha \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

β は地図より, N_w は図—11 より求め海風の各風向 N について

$$r_{Nx} = r_N \cos \theta_N \quad r_{Ny} = r_N \sin \theta_N \dots\dots\dots (29)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sum r_{Ny}}{\sum r_{Nx}} \dots\dots\dots (30)$$

海風による波エネルギーの合計は半楕円の面積に等しいと考える

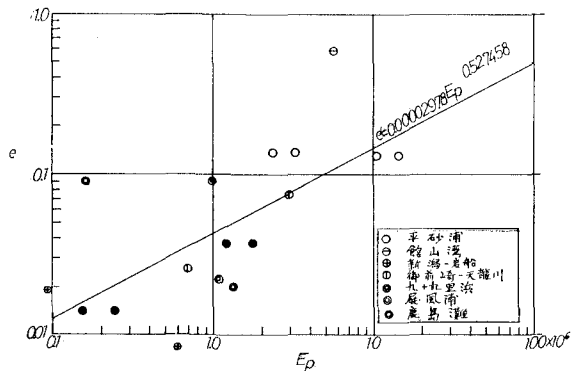
$$\frac{\pi A \cdot B}{2} = \frac{\pi}{16} \sum r_N^2, \text{ ゆえに } A \cdot B = \frac{1}{8} \sum r_N^2 \dots\dots\dots (31)$$

これより A, B を図—11 の波エネルギー分布図をつつむように決定する (図—11 の点線)。

(3) 固定点付近の可動物質海岸の始点位置

固定点付近の岩礁露出部の長さ (1:50 000 地形図より) とその部分の波のエネルギーの海岸に平行な成分 E_p との間には図—13 の関係が見られる。

(4) 形状係数について



図—13

式(19)中の C は式(14)の無次元量の関数である。

$$n_e = \frac{2k\sigma h^4}{\sqrt{1-k^2}A^2} \frac{1}{f_2\left(\frac{h}{l}, \frac{h}{d_{50}}, \frac{\sigma}{\rho}, \frac{gd_{50}^3}{\nu^2}\right)} \quad (32)$$

固定点付近が浅く沖波と考えられない場合

$$A^2 = K_f^2 A_0^2 \quad (33)$$

K_f : 波高減衰係数, A_0 : 沖波による A を用い, 影響の大きい無次元量のみを用い

$$f_2 = k_0 \frac{h}{l} \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^4 \quad (34)$$

k_0 : 定数(g を含める)と仮定すると

$$n_e = \frac{2k\sigma l d_{50}^4}{k_0 \sqrt{1-k^2} h A^2} \quad (35)$$

図-14のように実際海岸にその海岸の α, k, A を用い n_e を仮定した計算海岸線を重ね最も適合する n_e を求め式(35)の関係を図示すると図-15が得られる。これよりきわめて近似的に式(3)の仮定が成り立つこ

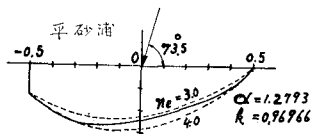


図-14

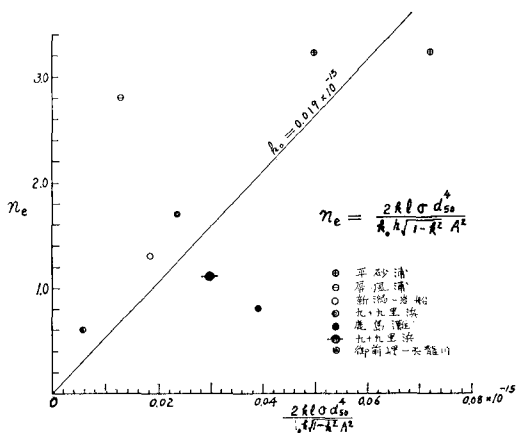


図-15

とがわかる。

なおこの計算には海図および1:50000地形図による海岸線形と平均水深を用い, 波エネルギーの計算には各海岸に最も近い測候所の一か年間の風向, 風速の毎時記録を使用した。地形測量のときと気象観測の年とは必ずしも一致しない。今後さらに海岸地質の分布および海岸の基本形状と特殊気象による変形などについて研究が必要である。

7. む す び

地形と気象観測より波エネルギー精円を作り海岸の基本平面形状を求めることができた。これより気象変化または海岸の人工的变化による海岸形の変化を推定できる。

この研究には現地調査に防衛大学校土木工学教室土質工学講座, 水工学講座の教官, 職員の多大の協力を得るとともに航空工学教室電子計算機 TOSBAC-3400 を利用することができ, 研究費の一部は文部省科学研究補助金によるものである。ここに深甚の謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) Ippen: Estuary and Coastline Hydrodynamics, p. 428.
- 2) 真嶋恭雄: 沿岸漂砂量について, 第5回海岸工学講演集, 1958.
- 3) 真嶋恭雄: 海岸線の安定形状について, 第6回海岸工学講演集, 1959.
- 4) 真嶋恭雄: 海岸形状と抵抗性について, 第7回海岸工学講演集, 1960.
- 5) Y. Mashima: A Study on the Volume of Littoral Drift, Coastal Engineering in Japan, Vol. 3., Nov. 1960.
- 6) 真嶋恭雄: 島および湾の海岸形状について, 第8回海岸工学講演集, 1961.
- 7) Y. Mashima: Stable Configuration of Coast Line, Coastal Engineering in Japan, Vol. 4, 1961.
- 8) 紫垣和三雄: 常微分方程式の数値解法.
- 9) 沼沿岸三郎・本間仁: 水工学便覧.