

海岸侵食論

京都大学防災研究所教授・工博 岩 垣 雄 一

1 概 説

1-1 海外侵食研究の現況

著者がかつて「汀線侵食」と題して、これに関する従来の研究をとりまとめ発表したのは、昭和29年のことであった¹⁾。いまこの小論を書くにあたって、12年前のその論文を開き、現状と比較してみると、漂砂についての定量的な取扱いを試みようとした点や、海岸構造物と海浜変形との関連について解明しようと努めた点など、二、三の著しい進展はあったが、侵食問題の本質的な発展はあまり見られなかったように思われる。

昭和29年というのは、わが国で初めて海岸工学に関する研究発表会が開かれ、講演集が刊行された年であるが、現在まで12回にわたって発表されたこの方面の研究論文数を各回ごとに表によって示すと、表-1のようになる。

この表にのせた侵食関係の論文というのは、海外侵食に直接関連のある漂砂や沿岸流、あるいは河口閉塞、突堤などを含めたものであって、この表から、この方面の研究が、昭和32～34年をピークとして、急激に減少し、昭和40年度ではわずかに2編しか発表されていないことがわかる。

一方、参考のために、海岸工学国際会議の論文集にあらわれた、この方面の論文数を示す表-2のようになる。この表からは、侵食関係の論文が最近減少したという傾向は見られず、ほぼ一定の割合で発表されており、急減したのはわが国のみの現象である。この事実は、最近波浪に関する研究が非常に増大していることも原因であるが、侵食・漂砂についての研究が何か壁につきあたったことを示しているのではないかと思われる。

表-1 海岸工学講演会講演集に発表された侵食関係論文数

開催年(昭) (回)	29 (1)	30 (2)	31 (3)	32 (4)	33 (5)	34 (6)	35 (7)	36 (8)	37 (9)	38 (10)	39 (11)	40 (12)
侵食関係論文数	3	9	8	13	11	9	8	9	2	3	6	2
全論文数	16	19	25	23	24	20	28	35	31	32	42	39
比率 (%)	19	47	32	57	46	45	29	26	6	9	14	5

表-2 海岸工学国際会議論文集に発表された侵食関係論文数

発刊年(昭) (回)	26 (1)	27 (2)	28 (3)	29 (4)	30 (5)	33 (6)	36 (7)	38 (8)	39 (9)
侵食関係論文数	13	7	7	11	10	12	21	13	17
全論文数	35	28	26	28	43	54	59	45	53
比率 (%)	37	25	27	39	23	22	36	29	32

1-2 海岸侵食と漂砂

海岸が侵食されたり、逆に砂が堆積するのは、何らかの外力によって海岸の砂が移動するからであり、またただ単に砂が移動するのみでは海浜に変形はおこらないので、後述するように、砂の移動量が一樣でないことに起因している。したがって、海岸侵食と漂砂とは、表裏一体をなすもので、海岸の侵食を研究することは、漂砂の挙動を明らかにするという一面をもっている。

このことは、ちょうど河川において、河床変動の研究をするとき、流砂の問題を取扱うのと同じであって、その際、限界掃流力や掃流砂あるいは浮遊流砂などの量的把握に努め、底質や水理量との関係を明らかにすることに似ている。いま、単位幅当たりの流砂量を q_T 、河幅を B 、ある基準面から測った河床高を Z 、流れの方向を x 、砂の空隙率 ϕ を100で割ったものを λ とすれば、次式が成立する²⁾。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B(1-\lambda)} \frac{\partial(q_T B)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

この方式の意味することは、

(1) 河幅全体の全輸送量 $q_T B$ が流れの方向に変化がなければ、 $\partial(q_T B)/\partial x = 0$ であるから、 $\partial Z/\partial t = 0$ となり河床は変化しない。もちろん、砂が移動しなければ $q_T = 0$ であるから、この場合も河床変動はおこらない。

(2) もし、全輸送量 $q_T B$ が流れの方向に減少する、すなわち、 $\partial Z/\partial t > 0$ となるから、河床は時間とともに上昇する。すなわち、砂は堆積する。

(3) 逆に全輸送量 $q_T B$ が流れの方向に増大すれば、 $\partial(q_T B)/\partial x > 0$ であるから $\partial Z/\partial t < 0$ となり、河床は時間とともに低下する。すなわち、河床が洗掘をうけることになる。ということである。

したがって、流砂量 q_T が流れの方向にどのように変化するかがわかればよいことになる。一般に流砂量は底質の性質と河川の水理量の関数であるから、底質の性質や水理量が流れの方向にどのように変わるかを知る必要があり、また変動の絶対量を求めるには、(1)式からわかるように時間 t で積分しなければならないので、底質の性質や水理量の時間的な変化も与えられなければならない。しかし問題は、それ以前に流砂量 q_T が底質特性と水理量のどのような関数によってあらわされるかであって、流砂そのものの挙動とその正確な定量的表現を見出すことがまず第一に必要である。

これらのことは、海浜変動に対してもいえることであって、波や流れによって底質が浮遊したりあるいは掃流型式で輸送される機構、底質が移動を始めるいわゆる砂移動限界水深など、漂砂の挙動とその量的関係を明らかにすることが、海岸侵食を取扱うときの基本問題であることはいうまでもない。

このように、海岸侵食と漂砂は、原因と結果あるいは裏と表というような関係であるから、漂砂についての十分な解説をすべきであるが、これについては、すでに昨年、堀川によって紹介されているので³⁾、ここではくわしくは述べない。

1-3 海岸侵食研究の問題点

侵食研究を実施するに際しての個々の問題点については、後述するそれぞれの項目において指摘するつもりであるが、この研究を遅らせている基本的な点について、ここで若干触れておきたい。

(1) 観測の困難性

海岸が侵食されるのは、ほとんどの場合、冬季季節風とか台風時の高波によるものであって、このような嵐の場合に観測資料を得ることは普通の場合不可能に近い。これは暴風時に、資料がほしい場所へ行けない、すなわち海上へ出られないということもその理由の一つであるから、暴風時でも観測ができるような海中観測塔や長大棧橋を利用すれば、この方面の研究はさらに進展するであろう。ただ、従来の海浜変形の観測を嵐の前後の静穏なときに測量していたのに対して、井島ら⁴⁾⁵⁾は陸上からケーブルの付いた水圧測定用ユニットを火薬でもって海上へ投射し、水圧測定用ユニットが海底へ沈んだ後、ケーブルを一定の速度で引張り、そのユニットを海底に沿わせながら回収することによって、海底地形を測量する方法を考察したが、この方法を用いると、高波のときでも海底地形の変動を測定することが可能となるので、この装置の実用化が望まれる。またこの方法を利用して、漂砂の測定をすることも考えられ、その開発が望まれる。

(2) 外力の変動性

海浜変形がおこるのは、底質が移動するからであり、底質の移動は流れに起因し、また流れは波浪や潮流あるいは風が原因である。さらに波浪は風によって発生発達する。これらの外力は、いずれも時間的に規則的でなく、その大きさや方向が時々刻々変化する。この場合平均値の周りに変動するようなエルゴード性をもつ場合はまだしも、海岸に近づくほど random な運動をする傾向をもち、原因と結果との関連を見出すことが非常にむずかしくなる。このような外力の変動性という特徴が、漂砂や侵食問題の学問の発展を極端に遅らせている。

(3) 外力の非一様性

外力は時間的にも複雑に変動するが、同時に空間的にも一様でなく、場所によって外力の大きさや方向が異なる。すなわち、現象が三次元的であって、この特徴が海岸侵食をおこさしめる重要なポイントでもあるが、同時に現象の観測や解析を複雑化させている大きな原因の一つでもある。

(4) 底質の淘汰性

底質の大きさやその粒度分布あるいは鉱物組成などは、同じ場所でも時間によって変化するし、場所的にも変動する。これは、底質が流れによって輸送されるからであるが、その淘汰性は河川と異なっていて非常に著しい。河川流では、底質の浮遊の原因である乱れの強さ、あるいは渦動粘性係数が、流れの速度や水深とある定まった関数関係によってあらわされるが、海岸では波の作用が加わるので必ずしも河川流のように簡単ではない。波の攪乱作用と流れの輸送作用とが同時に働くので、底質の淘汰作用が非常に顕著にあらわれるものと思われる。このような底質特性の非一様性が逆に漂砂の方向を推定する方法として利用されているが、見方をかえれば、このような奇妙な現象が、侵食や漂砂現象の定量的取扱いを進めていく上に大きな障害となることはいなめない事実であろう。

2 海浜変形の原因論

2-1 漂砂の非一様性

いま、図-1に示すように、 x 軸を海岸に沿ってとり、それを直角沖方向に y 軸、鉛直上方に z 軸をとる。そして、単位幅当たり単位時間の漂砂量の x 方向の分値を q_x 、 y 方向の分値を q_y として

微小断面 $\delta x \cdot \delta y$ をもつ柱に出入する漂砂量と、海底の変動との関係を考え
ると、次式が得られる。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

Z の代わりに、水深 h を用いると、(2) 式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (3)$$

(3) 式からわかるように、海底地形の変動は、海岸に沿って移動する漂砂量の海岸に平行方向の距離的变化と、海岸に直角に移動する漂砂量のその方向の距離の変化の両者に起因している。

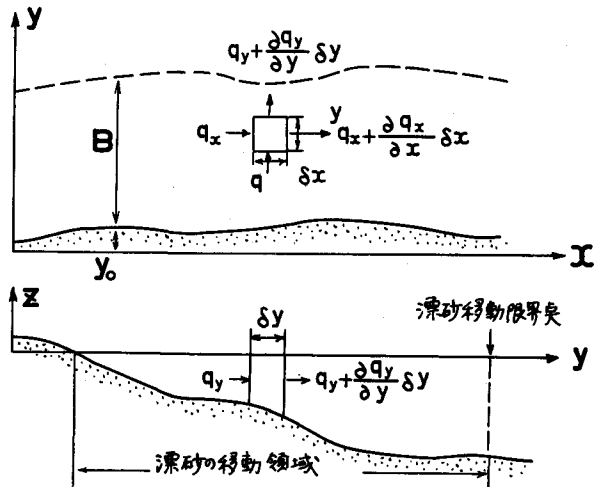


図-1 海底変動の基礎式を導く説明図

すなわち、漂砂の移動方向の漂砂量の距離的变化が海底地形の変動の原因であって、海底地形の変動に伴って汀線が後退したり前進することになる。いま、簡単のために、 $\partial q_x / \partial x$ による変動と $\partial q_y / \partial y$ による変動とに分けて考察することにした。

(1) 海岸に直角な方向の漂砂による海浜変形

現象を二次元的に考え、 $q_x = 0$ の場合を考えよう。この場合、(3) 式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (4)$$

と表わされる。(4) 式における q_y については、Vincent⁶⁾ や Inman - Bowen⁷⁾ の水平床における実験ならびに石原・樺木⁸⁾ の Bu Boys 式に基づく実験式があるが、漂砂帯の多くの領域を占める碎波後のいそ波帯における q_y を表現する量の資料は何もない。一般に q_y は波の峯が通過する uprush (打上げ波) のときと、波の谷が通過する backrush (引き波) のときで方向が変化するので符号が変わる。したがって、(4) 式を用いて議論するときには、 q_y の一周期の平均値 $\bar{q}_y$ によって考察する必要がある。

図-2 は $1/8$ の初期勾配をもつ海浜が、波形勾配 $H_0/L_0 = 0.0331$ の波によって、平衡断面に段々変化していくときの q_y の分布を示したもので⁹⁾¹⁰⁾、平均粒径 $d_m = 0.52 \text{ mm}$ の砂を用いて行なった実験の結果である。この場合は、砂の移動形式は主として掃流によるものであるが、移動量分布の様がよくわかる。前述したように、海浜変形をもたすのは、一周期の平均値、ここでは uprush による移動量と backrush による量の差 $\bar{q}_y$ の分布形であって、図-2 で斜線によって示したものがそれである。正の例は uprush による量、すなわち岸方向に向う量が多いことを、負の例は backrush すなわち沖方向への量が多いことをあらわしている。(4) 式にしたがって、移動方向に漂砂量が增大す

る部分は侵食をうけ、逆に減少するところは堆積することになるから、図に示したようにEで示した侵食部分とDで示した堆積部分、さらに両者の漂砂量が打消し合っているEqで示す平衡部分とが存在することになる。実験開始後1時間から時間が経つにしたがって、uprushとbackrushによる漂砂量の差が減少し、遂には平衡に達することがわかる。また、図に示すような漂砂量の分布形については、篠原・椿・斎藤が行なった実験においても得られている¹¹⁾

普通の海浜では、冬季には季節風による「風波」によって海波は侵食され汀線は後退するが、春から夏にかけては逆に「うねり」によって堆積し、汀線は前進して元にかえる。図-3は米国のCalifornia州、Scripps Pierにおける海浜断面の季節的変化を示したもので¹²⁾、秋と翌年の春との断面変化の様子をみると、前浜から外浜の部分にかけて侵食され、沖側は堆積して沿岸砂州を形成するが春から秋にかけては、沿岸砂州は消滅するかあるいは規模が小さくなり、冬季に侵食された部分は堆積して元へかえっている。このような季節的変化の現象は、冬季と春から夏にかけての波とでは、その特性が非常に異なり、 $\partial \bar{q}_y / \partial y = 0$

に対応する海浜の平衡断面形 $h = f(y)$ が、冬季には波形勾配の大きい波による沿岸砂州を伴ったいわゆる暴風海浜の断面形になり春から夏にかけては来襲波の波形勾配は小さく、いわゆる正常海浜あるいは暴風海浜でも沿岸砂州の規模の小さい断面形に変わるからである。このような季節的変化は米国のNorth Atlantic海岸についてDarling¹³⁾が、また北海道日高海岸について尾崎¹⁴⁾が指摘している。

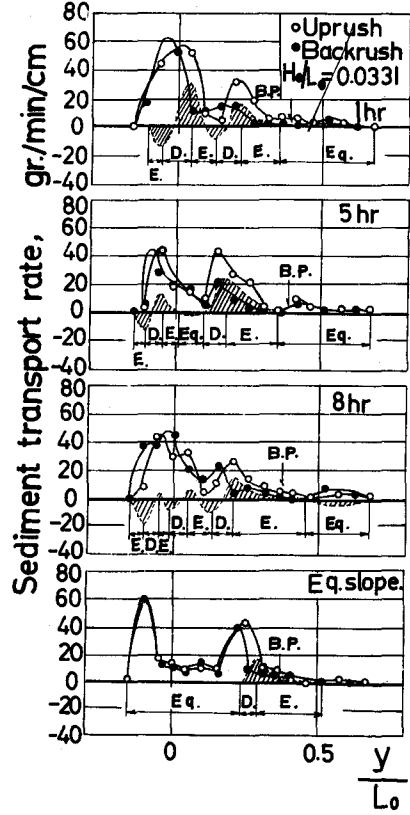


図-2 1/2の初期勾配から平衡勾配に達するまでの海岸に直角方向の漂砂量の分布の変化(E:侵食,D:堆積,Eq:平衡)

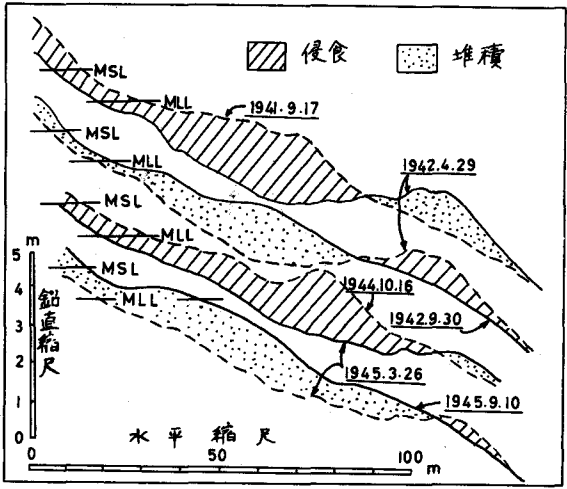


図-3 海浜断面の季節的変化(Shepard)による)

平衡勾配の概念からいえば、こうした季節的变化がおこるのは、季節によって性質の異なった波が来襲し、それにともなつて、 $\partial \bar{q}_y / \partial y = 0$ というバランスが破れ、 $\partial h / \partial t$ が0でなく有限の値をもつようになるからであるといえる。しかし、侵食されてもそれが一時的なもので、また元へかえるのであれば、本当の意味の海岸侵食であるとはいえない。

(2) 海岸に平行方向の漂砂による海浜変形

いま、海岸に直角な方向に対しては、季節的な変形をし、一年たてば元へかえると考えて、(3)式において $\partial q_y / \partial y = 0$ とすれば、次式のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_x}{\partial x} \quad (5)$$

ここで、図-1に示すように漂砂帯の幅を B とし、漂砂帯全域における漂砂量を Q_x 、平均水深を $\bar{h}$ とすれば、

$$\begin{aligned} \int_{y_0}^{y_0+B} \frac{\partial h}{\partial t} dy &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{y_0}^{y_0+B} h dy - \left\{ h(y_0+B) \frac{\partial(y_0+B)}{\partial t} - h(y_0) \frac{\partial y_0}{\partial t} \right\} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} (B\bar{h}) - h(y_0+B) \left(\frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial t} \right) \\ &\approx B \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} - (h(y_0+B) - \bar{h}) \frac{\partial B}{\partial t} \\ \int_{y_0}^{y_0+B} \frac{\partial q_x}{\partial x} dy &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_0}^{y_0+B} q_x dy - \left\{ q_x(y_0+B) \frac{\partial(y_0+B)}{\partial x} - q_x(y_0) \frac{\partial y_0}{\partial x} \right\} = \frac{\partial Q_x}{\partial x} \end{aligned}$$

であるから、(5)式は次のように変形される。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = \frac{(h(y_0+B) - \bar{h})}{B} \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial Q_x}{\partial x} \quad (6)$$

一般に $h(y_0+B)$ は砂移動限界水深をあらわすから、 h_i で示すことにする。いま簡単のために、 $B \propto h_i$ とすれば、(6)式は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = \left(1 - \frac{\bar{h}}{h_i} \right) \frac{\partial h_i}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial Q_x}{\partial x} \quad (7)$$

(7)式より、この場合の海浜変形は、海岸に沿う全漂砂量が距離とともに変化することによるものと砂移動の限界水深が時間とともに変化することによるものの二つが関係することがわかる。したがって、

1 たとえ様な海浜で、 $\partial Q_x / \partial x$ が0であっても、波高が増大し、 h_i が大きくなるような段階では、 $\partial h_i / \partial t > 0$ すなわち $\partial \bar{h} / \partial t > 0$ であるから、海岸侵食がおこる可能性がある。

2. h_i が時間的に変化しないときには、海浜変形はもっぱら $\partial Q_x / \partial x$ に左右され、漂砂方向に Q_x が増大する場所では $\partial \bar{h} / \partial t > 0$ となって海岸侵食がおこり、逆に Q_x が減少するような場所では海底が上昇し、汀線は前進する。

(3) 砂移動限界水深 h_i と沿岸漂砂量 Q_x

波によって底質が移動を始める限界水深 h_i については、底面の層流境界層を考慮した野田・井保

の研究¹⁵⁾があるが、現在利用されている公式としては、

$$\left(\sinh \frac{2\pi h_i}{L} \right) / \frac{H}{H_o'} = \alpha \left(\frac{H_o'}{L_o} \right) \left(\frac{d}{L_o} \right)^n \quad (8)$$

の形のものである。ここに、 H および L はその点の波高および波長、 H_o' および L_o は相当沖波波高および沖波波長、 d は底質粒径である。この式で、 α および n の値が提案者によって異なり、表-3のような値が用いられる。

(8)式の左辺は h_i/L_o の関数であって、両者の関係は図によって示すことができる¹⁸⁾、ただ $h_i/L_o \leq 0.15$ の範囲では

$$\left(\sinh \frac{2\pi h_i}{L} \right) / \frac{H}{H_o'} = 62 \left(\frac{h_i}{L_o} \right)^{0.77} \quad (9)$$

とあらわすことができるので、(8)式はつぎのように変形される。

$$\frac{h_i}{L_o} = \left(\frac{\alpha}{62} \right)^{1.3} \left(\frac{H_o'}{L_o} \right)^{1.3} \left(\frac{d}{L_o} \right)^{1.3n} \quad (10)$$

この式より、移動限界水深は相当沖波波高の13乗に、沖波波長の0.35～0.025乗に比例し、底質粒径の0.65～0.325乗に逆比例することがわかる。したがって、限界水深には波高が最も大きく影響することが理解される。

つぎに沿岸漂砂量 Q_x であるが、CaldwellおよびSavageはいずれも波のエネルギーとの関係であらわそうと試み、それぞれ

$$Q_x = 0.004 E_i^{0.8} \quad (11)$$

および

$$Q_x = 0.00024 E_i \quad (12)$$

によってあらわされるとした¹⁹⁾。ここに Q_x の単位は(m^3/day)であり、 E_i は海岸に沿っての単位長さ、単位時間当たりの波のエネルギーで($Kg \cdot m/day \cdot m$)である。またManoharは、底質粒径の効果をも考慮し、

$$Q_x = 0.885 E_i^{0.91} d^{0.59} (\sigma/\rho - 1)^{-0.41} \quad (13)$$

を提案した²⁰⁾、ここに、 Q_x の単位は(ft^3/day)、 E_i は($lb \cdot ft/day \cdot ft$)、 d は(ft)、 σ および ρ はそれぞれ砂および水の密度である。

さらに、岩垣・樫木はKalinske-Brown型の流砂量公式と沿岸流速の公式とを結び付けて、次の実験式を提案した²¹⁾²²⁾。

表-3 α および n の値

提 案 者	佐藤・岸 ¹⁶⁾	石原・樫木 ⁸⁾	佐藤・田中 ¹⁷⁾	
α	0.098	5.85	1.77	
n	-1/2	-1/4	-1/3	
移動形式	*	初期移動	全面的移動	集団的移動

* 砂粒に作用する水粒子の速度を最大の1/2にとっているため、かなり移動すると考えられる。

$$\frac{Q_x}{\psi} = 317 \left(\frac{E_i i^{2/3}}{\varphi} \right)^{3/2} \quad (14)$$

ここに,

$$\psi = g^{1/2} (H'_0/L_0)^{1/6} H_0'^{3/2} i^{1/3} d (\sin 2\alpha_b)^{1/3} \cos \alpha_b,$$

$$\varphi = (\sigma - \rho) g^{3/2} d H_0'^{1/2} L_b (H'_0/L_0)^{1/6} (\sin 2\alpha_b)^{1/3},$$

$$E_i = (1/16) \rho g (L_b H_b^2 / T) \sin 2\alpha_b$$

で, i は砕波点から汀線までの平均海底勾配, α_b は砕波点における波の峯線と汀線のなす角, T は波の周期, g は重力加速度, $\text{suffix } b$ は砕波点における値をあらわす。

(14)式をさらに, $H_b \approx H'_0$, $T = (2\pi L_0/g)^{1/2}$ および $H'_0 = K'_0 = K_b H_0$ (K_b : 砕波点における屈折係数) の関係を用いて書き直すと,

$$\frac{Q_x}{k H_0^3 d^{-1/2} (H_0/L_0)^{-2/3}} = K_b^{1/3} i^{1/3} (\sin 2\alpha_b)^{1/3} (\cos \alpha_b) \quad (15)$$

$$\text{ここに, } k = 317 (1/16)^{3/2} (\sigma/\rho - 1)^{-3/2} g^{1/2} (2\pi)^{-3/4}$$

となる。 K_b および α_b は等深線が汀線に平行な海岸の場合には H_0/L_0 と沖波の入射角 α_0 の関数であり, i は平衡勾配の場合に H'_0/L_0 によって定まると考えれば, (15)式の左辺は H_0/L_0 と α_0 の関数としてあらわされることになる。図-4は H_0/L_0 をパラメーターとして(15)式の左辺と α_0 との関係を示したもので, この図から波形勾配に無関係に, α_0 が 40° のときに沿岸漂砂量が最大となることがわかる。

なお, (14)式を検討することによって, Q_x は沖波波高 H_0 の3~4乗に比例すること, また底質粒径 d の $1/2$ 乗に逆比例することが見出される。(13)式で Manohar は Q_x が d の0.59乗に比例しているが, これは疑問と思われる。

2-2 漂砂の非一様性をもたらす原因

前節においては, 漂砂の非一様性が海浜変形を引き起こす原因であることを述べた。とくに長期的な変形は, 海岸に沿う漂砂量 Q_x が一様でないことによるものであり, Q_x は波高の3~4乗に比例するので, 波高が漂砂の移動方向に増大するときは海岸侵食がおこること, また沖波の入射角 α_0 が 40° より小さければ, α_0 の増大とともに漂砂量も増加するので, 波高と同様, 漂砂方向に α_0 が増大すればやはり侵食がおこる(砕波点における入射角 α_b についても同様のことがいえる)ことになる。

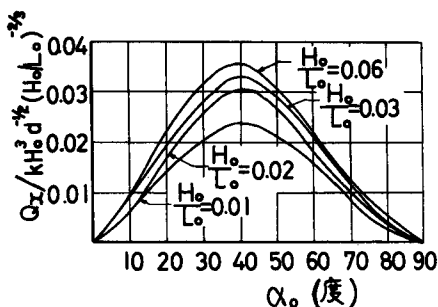


図-4 沿岸漂砂量に及ぼす沖波の入射角 α_0 の影響

図-5は以上のことを模式的に説明したもので、図のように局部的に入り込んだ海岸に、波が斜めに来襲した場合、波の入射角（碎波点の） α_0 が各点で異なる。したがって、海岸漂砂量 Q_x が海岸に沿って一様でない。前述のように漂砂の方向に Q_x が増大する場所は侵食をうけ、逆に減少するところは砂が堆積し、汀線は破線で示すように前進したり後退するような傾向を示すことになる。

この節では漂砂の兆一様性をもたらす原因について考察してみよう。

(1) 地形上の原因

これは海岸地形上侵食をうけざるを得ないという、いわゆる運命論である。いま図-6に示すような長円状の湾あるいは湖に面した海岸 $0-x$ を考えることにする。この海岸に N 方向の風が吹いた場合の吹送距離（対岸距離）の x 方向の分布は図の(a)のようになり、また W 方向の風のときには(b)のようになる。吹送距離 F と沖波波高 H_0 との関係は、風の吹送時間が最小継続時間より長ければ、次式によって表わされる²³⁾。

$$\frac{gH_0}{U^2} = 0.26 \tanh \left\{ \frac{1}{10^2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\} \quad (16)$$

別にこの式でなくても、SMB法のFetch graphでもよいが、要するに風速 U を一定とすれば、 F が大きくなれば H_0 も増大することがわかればよい。このことから、図の(a)にしても(b)の分布と波高

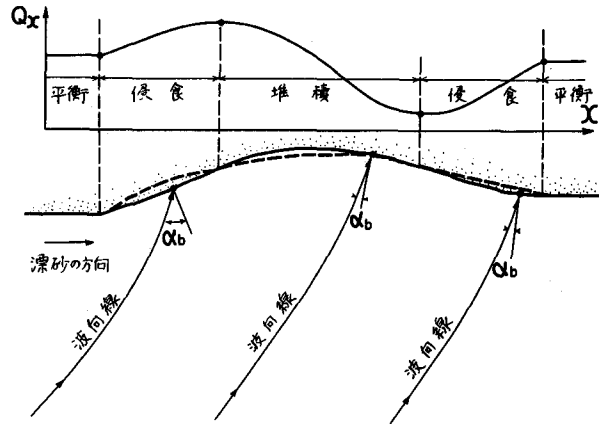


図-5 海浜変形の長期的変化の機構説明図

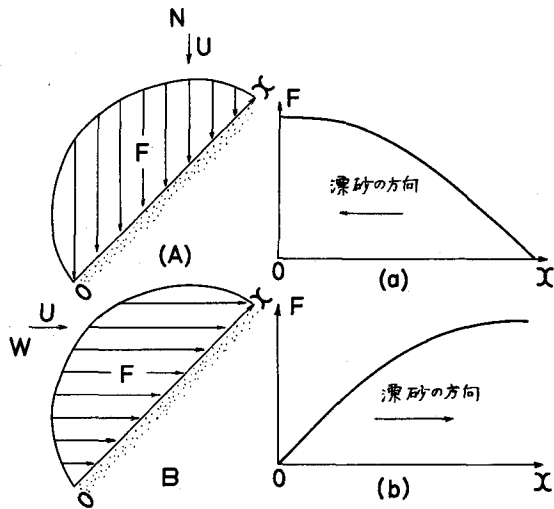


図-6 長円状の湖あるいは湾に面した海岸の侵食機構

いるかどうかはわからないが、傾向としてはあっているように思われる。

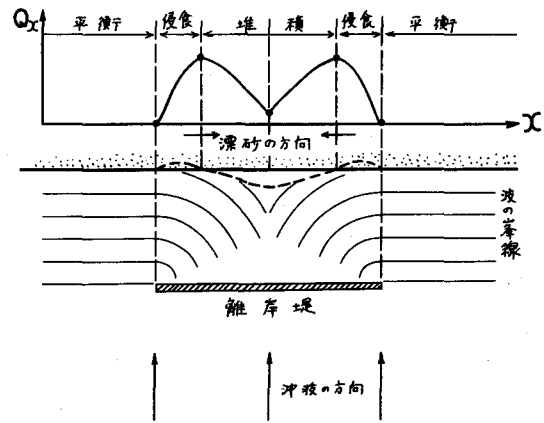
なお、天の橋立（京都府）、弓が浜（鳥取県）、三保海岸（静岡県）などのように、地形的な関係から砂州が延びてできた海浜、後述するトンボロによって島と陸地がつながった江の島（神奈川県）の海浜など、各種の海浜があるが、これらはいずれも漂砂の非一様性に起因してできたものである。

(2) 構造物による原因

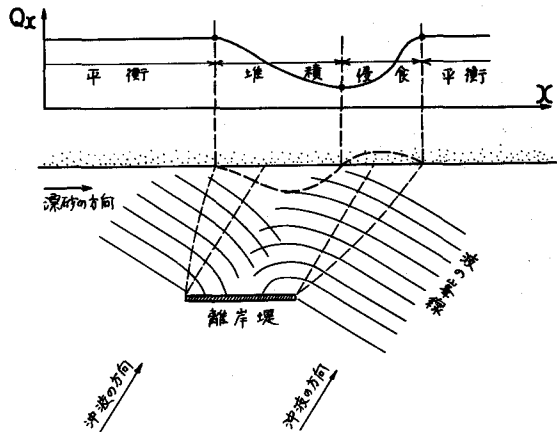
(a) 離岸堤構造物

いま図一9および10に示すような離岸堤構造物を平衡海浜に構築した場合の海浜変形を考察してみよう。図一9は汀線に直角に波が来襲し、離岸堤が存在しなければ漂砂がない場合である。図に示すように、離岸堤を設けると、波が回折して離岸堤の影の部分で波の方向と波高が変化する。したがって漂砂量の分布は、離岸堤の中央部へ向うにしたがって、いったん増加し、あるところで極大があらわれ、ついで減少するような傾向のものとなる。このような分布の場合は、前述したように、漂砂量が移動方向に増大する部分は $\partial Q_x / \partial x > 0$ であるから、侵食が行い、逆に中央部の減少する部分は $\partial Q_x / \partial x < 0$ であるから、砂が堆積して汀線が前進する。この堆積が進むと舌状の汀線形状となり、トンボロが形成され、汀線が離岸堤と接続する場合も起こる²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾。足立らは最終的な汀線形状が、回折した波の峯線と非常によく一致することを見出している²⁶⁾が、これは回折した後の波の入射角が0になると海岸に沿う漂砂がなくなり海浜変形がおこらなくなることを意味しており、上の見解と一致している。

また図一10は沖波が汀線に斜めに入射した場合の、離岸堤による海浜変形を示したもので、やりに離岸堤による波の回折によって、海岸に沿う漂砂量の分布は図に示すよう



図一9 離岸堤構造物による海浜変形(a)



図一10 離岸堤構造物による海浜変形(b)

になり、やはり $\partial Q_x / \partial x > 0$ の部分と $\partial Q_x > 0$ のところが存在するので、舌状の汀線形状と侵食部分とがあらわれる。この場合に注意すべきことは、離岸堤の沖側に顕著な漂砂がなく、また離岸堤が適当に長ければ、突堤と同じように沿岸漂砂を阻止する役目をするので、その上手側は段々と砂が堆積する一方、下手側は漸次侵食され、その影響が次才に速くへ及んでいくことである。

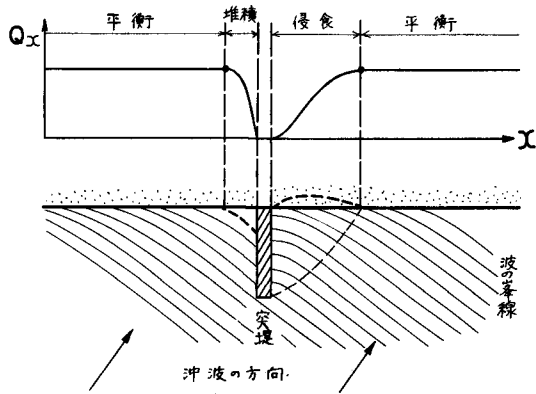
(b) 突堤構造物

図一 11 に示すような突堤構造物による海浜変形の機構を取り上げてみよう。

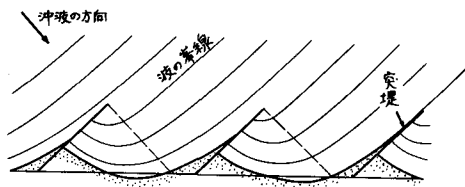
いま、突堤が十分に長く、かつ不透過性であれば、沿岸漂砂を完全に遮断するので、漂砂量分布は図に示すように、突堤において急減し 0 になった後、下手側では 0 から再び漸増して一定値にかえる分布形になる。したがって、突堤の上手側は砂が堆積して汀線が前進し、下手側は $\partial Q_x / \partial x > 0$ であるから侵食をうけることになる。突堤群のときには、この現象が連続的に繰り返えされ、図一 12 に示すように変形し、波の峯線と汀線が平行になってはじめて変形が終わり、平衡に達することになる。図一 13 は突堤を海岸線に対して直角でなく斜めに出した場合の海浜変形を示したもので、汀線形状がこのように変わることを永井が実験によって指摘している²⁸⁾。

(3) 流出土砂による原因

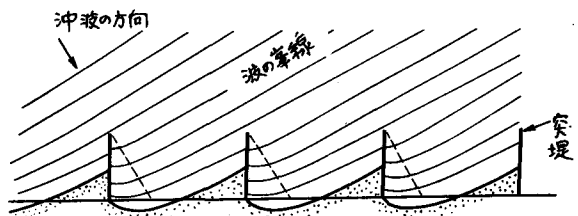
河口から土砂が流出すると、その流出土砂によって河口デルタ（三角州）が形成され、海浜の変形がおこる。したがって、流出土砂量が何らかの原因によって減少すると、三角州が小さくなり、海岸侵食の原因となる。わが国の海岸は、この三角州の縮小による侵食が非常に多いと考えられる。恐らく新潟海岸や鳥取県の皆生・日吉津海岸の侵食も、この現象によるものであろう。河口デルタの発達による海岸線の形状についての理論的研



図一 11 突堤構造物による海浜変形



図一 12 突堤群による海浜変形(a)



図一 13 突堤群による海浜変形(b)

究には, Grijm²⁹⁾30)と Bakker - Edelman³¹⁾のものがあるが, ここでは後者の理論を紹介してみよう。

Bakker - Edelman は理論的取扱いを簡単にするために, つぎのよに仮定した。

1) 潮汐も潮流も考えない。2) 漂砂に及ぼす流れの影響は無視される。3) 最初, 海岸線は直線である。4) 前浜の勾配は水深 h_i まで一定であり, 波の影響は水深 h_i までしか及ばない。そしてそれより沖側の水深は一定値 h_i である。5) 河口は常に座標の原点にあり移動しない。6) 河口流出土砂量は時間的に一定である。7) 一定の波高と波長をもった波が, x 軸と波の峯線のなす角 β の方向から連続的に来襲する。8) 波の屈折, 回折および反射は無視する。9) 漂砂量 Q_x と, 波の峯線と汀線のなす角 α_0 との関係は, 偏微分方程式が解折的に解けるように簡易化されたものを用いる。

Q_x と α_0 との関係は, 図-4 に示したように $\alpha_0 \approx 40^\circ$ までは α_0 の増大とともに Q_x も増加するが, 40° 付近を越えると Q_x はかえって減少する。これを数式化するのに, $Q_x = Q_{xm} \sin 2\alpha_0$ とおく場合が多いが, Bakker - Edelman は両者の関係をつぎのようにおいた。

$$0 < \tan \alpha_0 < 123 : \quad Q_x = Q_{xm} K_1 \tan \alpha_0 \quad (17)$$

$$123 < \tan \alpha_0 < \infty : \quad Q_x = Q_{xm} K_2 / \tan \alpha_0 \quad (18)$$

ここに, $1/K_1 = K_2 = 123$

したがって, この式では漂砂量の最大は $\tan \alpha_0 = 123$, すなわち, $\alpha_0 \approx 51^\circ$ であらわれることになる。

仮定 4) によって, 図-14 に示すように, 前浜勾配と h_i および B は一定であるから, (7) 式において,

$$B \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = -h_i \frac{\partial y_0}{\partial t},$$

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

とすることができるから, (7)

式は次のようにかける。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + h_i(1-\lambda) \frac{\partial y_0}{\partial t} = 0$$

(20)

いま, 図-14 に示すよう

に, $\alpha_0 = \beta - \rho$ とすれば,

$$\tan \alpha_0 = \tan(\beta - \rho)$$

$$= (\tan \beta - \tan \rho) / (1 + \tan \beta$$

$$\cdot \tan \rho)$$

$$= \{ \tan \beta - (\partial y_0 / \partial x) \} / \{ 1 + \tan \beta \cdot (\partial y_0 / \partial x) \}$$

となるから, (20) 式はつぎのように変形される。

$$0 < \tan \alpha_0 < 123 \text{ の場合 (領域 1 とする)},$$

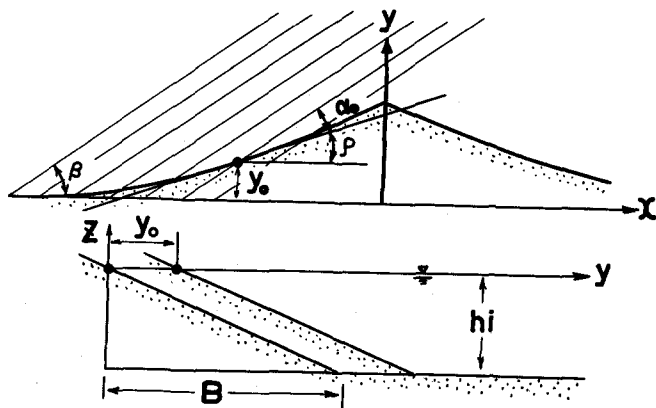


図-14 座 標 軸

$$K_1 \frac{\partial^2 y_0 / \partial x^2}{\{1 + \tan \beta (\partial y_0 / \partial x)\}^2} = \frac{\partial y_0}{\partial \tau} \quad (21)$$

$123 < \tan \alpha_0 < \infty$ の場合 (領域 II とする),

$$-K_2 \frac{\partial^2 y_0 / \partial x^2}{\{\tan \beta - (\partial y_0 / \partial x)\}^2} = \frac{\partial y_0}{\partial \tau} \quad (22)$$

ここで,

$$\tau = \frac{Q_m}{(1-\lambda)h_i} (1 + \tan^2 \beta) t \quad (23)$$

Q_m は (L^3/T) の次元をもっているから, τ は (L^2) の次元をもつことになる。

$$\text{ここで, } y_0 = f(u) \sqrt{\tau}, \quad x = u \sqrt{\tau} \quad (24)$$

$$\text{とおけば, } \partial y_0 / \partial x = df / du \text{ および } \partial y_0 / \partial \tau = (1/2\sqrt{\tau}) \{f - u(df/du)\}$$

であるから,

(a) 領域 I の場合

②式はつぎのようになる。

$$2K_1 (d^2 f / du^2) / \{1 + \tan \beta (df/du)\}^2 = f - u(df/du) \quad (25)$$

この微分方程式の解は

$$u = -A [e^{-v^2} + v\sqrt{\pi} \{E(v) + a\}] \quad (26)$$

$$\frac{df}{du} = -\frac{1}{\tan \beta} \left[\frac{2\sqrt{K_1}}{A\sqrt{\pi} \{E(v) + a\}} + 1 \right] \quad (27)$$

$$\text{ここに, } v = \frac{u + f \tan \beta}{2\sqrt{K_1}}, \quad E(v) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^v e^{-v^2} dv$$

で, A および a は積分常数である。

(b) 領域 II の場合

この場合, ②式は

$$-2K_2 (d^2 f / du^2) / \{\tan \beta - (df/du)\}^2 = f - u(df/du) \quad (28)$$

となり, この方程式の解は

$$u = -B [e^{w^2} - 2w\{\varphi(w) + b\}] \quad (29)$$

$$\frac{df}{du} = \tan \beta - \frac{2\sqrt{K_2}}{2B\{\varphi(w) + b\}} \quad (30)$$

ここに,

$$w = \frac{u \tan \beta - f}{2\sqrt{K_2}}, \quad \varphi(w) = \int_0^w e^{w^2} dw$$

で, B および b は積分常数である。

$f(u)$ 曲線はこの問題における基本曲線であって, ある時刻 t における関数 $y_0 = f(x)$ は, $f(u)$ がわかれば②式から求めることができる。領域 I の基本曲線は, 原点を通る 2 本の漸近線をもつ双曲線型のものであり, 領域 II の曲線は漸近線をもたない放物線型である。

いま新しい座標 $\bar{x}$ と $\bar{y}_0$ を導入し, $\bar{x}$ を波の峯線に平行にとると, ②式は

$$K_1 \frac{\partial^2 \bar{y}_0}{\partial \bar{x}^2} = (1 + \tan^2 \beta) \frac{\partial \bar{y}_0}{\partial \tau} \quad (31)$$

と簡単になり、その解は

$$\bar{y}_0 = \exp \{ -(K_1 a^2 \cos \beta) \tau \} \{ C_1 \sin a \bar{x} + C_2 \cos a \bar{x} \} \quad (32)$$

と得られる。一方、(22)式は

$$-K_2 \frac{\partial^2 \bar{x}}{\partial \bar{y}_0^2} = (1 + \tan^2 \beta) \frac{\partial \bar{x}}{\partial \tau} \quad (33)$$

となり、解は

$$\bar{x} = \exp \{ (K_2 a^2 \cos^2 \beta) \tau \} \{ C_3 \sin a \bar{y}_0 + C_4 \cos a \bar{y}_0 \} \quad (34)$$

によってあらわされる。

これらの解からすぐわかるように、領域Ⅰにおいては、汀線の変位の振幅は時間とともに減少し、攪乱は減衰するが、領域Ⅱにおいては、逆に大きくなり攪乱は時間とともに増大する。すなわち、前者では安定であるが、後者では不安定であることを示す。したがって、河口デルタの成長を取り扱う場合、領域Ⅰすなわち、いつでもどこでも(17)式が適用できるのでなければ、海岸線形状の安定な解を求めることができなくなる。

$u = 0$ における f の値 f_0 は、河川からの土砂流出量 Q_r と最大の漂砂量 Q_m の比 Q_r/Q_m の関数として、前出の諸式から求めることができる。図-15は $\tan \beta$ をパラメーターとした f_0 と Q_r/Q_m との関係を示す。

また、図-16波が正面から来襲する場合で、 $Q_r/Q_m = 2.0$ のときのデルタの形状と、波が斜めに入射する場合で $Q_r/Q_m = 0.978$ のときの形状を例として示す。

このように河川から土砂が流出し、それが漂砂の供給となると、河口にデルタが発達する。したがって、もし河口からの排出土砂量が減少したり、なくなったりすれば、デルタの大きさは時とともに小さくなっていき、そこに海岸侵食がおこる。

(4) その他の原因

その他の原因として、海岸に沿って底質特性が変化し、また海崖があったりして、漂砂量が海岸に沿って変動するとか、潮流が加わって局部的に漂砂の輸送量が増大するとか、飛砂のために汀線近くの砂が奥地へ運ばれるとか色々な原因が考えられ、実際には海岸の侵食機構はもっと複雑であろう。

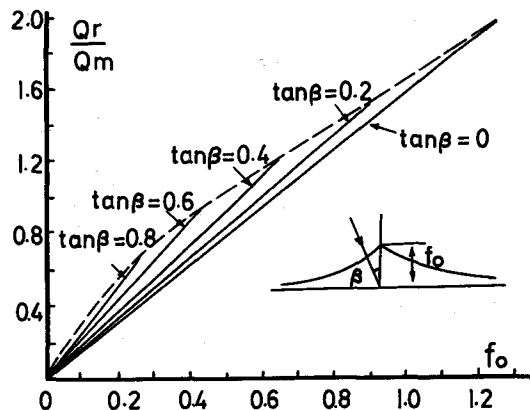


図-15 f_0 と Q_r/Q_m との関係
(Bakker-Edelmanより)

3 結 語

当初、以上のほかに海浜の平衡勾配論、海岸線形状論、侵食研究と調査の方法論、侵食防止対策論などにも触れたいと考えたが、そこまで筆を進めることができなかった。これらについては別の機会に述べたいと思う。いささか空論めいたことになったが、海浜変形の機構を説明する上に、このような考え方もあるということが理解されれば、筆者の喜びとするところである。

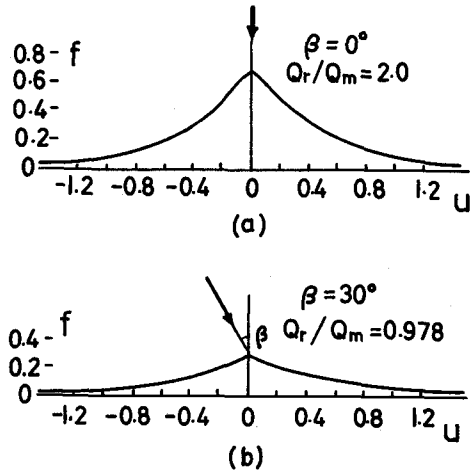


図-16 河口デルタの形状例
(Bakker-Edelmanより)

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一：汀線侵食，海岸工学研究発表会論文集，土木学会関西支部，昭29.11，pp. 69～80
- 2) 石原藤次郎編：応用水理学，中工，丸善，昭33.1，p 57
- 3) 堀川清司：漂砂論，1965 年度水工学に関する夏期研修会講義集，B. 海岸・港湾コース，水工学シリーズ65-14 pp. 1～25
- 4) 井島武士・鈴木禧実・岩崎秀人：投射型測深機について，沿岸海洋研究ノート，第2巻，第2号，昭38. 12，pp. 29～32.
- 5) Ijima, Takeshi: A Projection-Type Sounder, Proc. 9th Conf. on Coastal Engg 1964, pp. 417～424.
- 6) Vincent G. E.: Contribution to the Study of Sediment Transport on a Horizontal Bed due to Wave Action Proc. 6th Conf. on Coastal Engg., 1958, pp. 326～355.
- 7) Inman, Douglas L. and Anthony J. Bowen: Flume Experiments on Sand Transport by Waves and Currents, Proc. 8th Conf. on Coastal Engg., 1963, pp. 137～150.
- 8) 石原藤次郎・榎木享：漂砂の移動限界流速，限界水深及び移動量について，一漂砂の移動機構に関する基礎的研究（第3報）一，第7回海岸工学講演会講演集，昭35. 11，pp. 47～57.
- 9) 岩垣雄一・榎木享：海岸の平衡勾配に関する2，3の問題について，京大防災研究所創立5周年記念論文集，昭31. 11，pp. 233～240.
- 10) Iwagaki, Y. and T. Sawaragi: Experimental Study on the Equilibrium Slopes of Beaches and Sand Movement by Breaker, Coastal Engg. in Japan, Vol. 1, 1958 pp. 75～84.

- 11) 篠原謹爾・椿東一郎・斎藤隆：漂砂と波の特性に関する研究，第5回海岸工学講演会講演集，昭33. 11, pp. 61~64
- 12) Shepard, F. P. : Beach Cycles in South California, Beach Erosion Board, Tech Memo. No. 20, 1950
- 13) Darling, John M. : Seasonal Changes in Beaches of the North Atlantic Coast of the United States, Proc. 9th Conf. on Coastal Engg., 1964, pp. 236~248.
- 14) Ozaki, Akira : On the Effect of an Offshore Breakwater on the Maintenance of a Harbor Constructed on a Sandy Beach, Proc. 9th Conf. on Coastal Engg., 1964, pp. 323~345.
- 15) 野田英明・井保武寿：波による海底砂の移動限界と砂れんの発生，第11回海岸工学講演会講演集，昭29. 11, pp. 153~158.
- 16) 佐藤清一・岸力：漂砂に関する研究(7)，波動による海底剪断力と底質の移動，土木研究所報告，第85号—6，昭27, pp. 140~154.
- 17) 佐藤昭二・田中則男：水平床における波による砂移動について，第9回海岸工学講演会講演集，昭37. 10, pp. 95~100.
- 18) 防災ハンドブック編集委員会編：防災ハンドブック，技報堂，昭39. 12, p. 636.
- 19) Savage, R. P. : Laboratory Determination of Littoral—Transport Rates, Proc ASCE, Vol. 88, No. WW2, 1962, pp. 69~92.
- 20) Manohar, Madhav : 19) の Discussion, Proc. ASCE, Vol. 88, No. WW4, 1962, pp. 144~147.
- 21) 岩垣雄一・榎木享：沿岸漂砂量の新算定法について，第7回海岸工学講演会講演集，昭35. 11, pp. 59~67.
- 22) Iwagaki, Yuichi and Toru Sawaragi : A New Method for Estimation of the Rate of Littoral Sand Drift, Coastal Engg. in Japan, Vol. 5, 1962, pp. 67~79.
- 23) Wilson, B. W. : Graphical Approach to the Forecasting of Waves in Moving Fetches, Beach Erosion Board, Tech. Memo., No. 73, 1955, pp. 1~31.
- 24) 石原藤次郎・岩垣雄一・土屋昭：泉南海岸の侵食に関する基礎的研究，第5報泉南海岸の海底勾配と波高分布について，泉南海岸侵食調査報告書，第2報，昭27. 10, pp. 27~40.
- 25) Sauvage de Saint Marc, M. G. and M. G. Vincent : Transport littoral formation de fleches et de tombolos, Proc. 5th Conf. on Coastal Engg., 1954, pp. 296~326.
- 26) 足立昭平・小合彬生：港湾埋没に関する実験的研究，第5回海岸工学講演会講演集，昭33. 11, pp. 81~86.
- 27) Adachi, Shohei, Toru Sawaragi and Akio Ogo : The Effects of Coastal Structures on the Littoral Sand Drifts, Coastal Engg. in Japan, Vol. 2, 1959, pp. 85~98.
- 28) 永井荘七郎：海岸防砂堤に関する研究，海岸工学講演会講演集，昭30. 11, pp. 107~116.
- 29) Grijm, W. : Theoretical Forms of Shorelines, Proc. 7th Conf on Coastal Engg.,
- 30) Grijm, W. : Theoretical Forms of Shorelines, Proc. 9th Conf on Coastal Engg., 1964, pp. 219~235.
- 31) Bakker, W. T. J. N. P. and T. Edelman : The Coastline of River—Deltas, Proc. 9th Conf. on Coastal Engg., 1964, pp. 219~235.