

海岸侵食の波動性について (1)

——静岡海岸の場合——

土 屋 義 人*

1. 緒 言

海岸侵食の現象については、従来、汀線変化の予測モデルがいわゆる one-line model に依存してきたこともあって拡散現象として取り扱われてきた。しかし、実現象では、たとえば河口デルタの縮小に伴う海岸侵食でも、また沿岸漂砂の遮断による海岸侵食でも、その要因の近くでは著しい侵食が起こるが、それが下手側に移動したり、ときには思わぬところが侵食されたり、決壊することはよく経験してきたことである。上越・大潟海岸を調査した経験から、随分以前より、果たして侵食現象が拡散であるか、波動であるか、またはそれらの複合ではないか思考してきたが、最近の宇多ら (1994) によって土砂の集合体の移動速度から erosional wave の位相速度が見い出された。

本研究では、静岡海岸の汀線変化の資料を解析して、汀線変化として現われた侵食現象の波動性について調べるとともに、沿岸漂砂量方程式と海浜変形の連続式とに基づいて展開した波動・拡散理論から海岸侵食の波動性について考察する。

2. 汀線変化資料の解析

(1) 静岡海岸の資料

まず、静岡海岸は図-1 のように安部川を唯一の漂砂源とする海岸であるが、豊島ら (1981) によると、昭和34年の伊勢湾台風、昭和41年台風6626号によって安部川河口左岸が被災したが、昭和42年までにはほぼ全域に海岸護岸が設置された。そのころから海岸侵食の傾向が

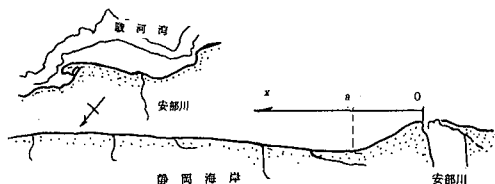


図-1 安部川を漂砂源とする静岡海岸と座標

現われたので、昭和44年より全域にわたって深淺測量が実施されてきたが、昭和52年ころまでは侵食が認められただけでも護岸が決壊するような災害は起こっていなかったようである。しかし、それ以降、海岸堤防は随所で決壊し、侵食範囲も順次北進した。その後、海岸侵食はさらに著しく、現在では、ほとんど全域に離岸堤が設置されている。漂砂源としての安部川では、1968年以前には河道における砂利採取が広範囲に行われ、これによる漂砂源の減少により著しい海岸侵食が起こり、その範囲が北進したといわれる (宇多ら, 1994)。

このような海岸侵食において、それに伴う汀線変化の現象が果たして拡散現象として取り扱えるか、または波動的な現象として考えなければならないかを考察するためには、できるだけ侵食の初期の資料で、構造物などの影響の少ない時期のものが好都合である。しかし、過去の資料については入手が困難であったので、本研究では、元来静岡県資料であるが、現在、入手できるものとして、侵食が始まりだしたころの豊島ら (1981) の資料のほか、宇多ら (1994) の資料および静岡県 (1994) による汀線変化の最近の資料を用いた。そのために、沿岸方向の距離の表示における単位距離に相違を生じたことはやむをえない。

(2) 資料解析の方法

汀線変化の資料では、通常100mまたは200m程度の間隔で測量されているが、海岸侵食の現象の空間的規模はこれよりかなり大きく、汀線変化として海岸侵食の現象を取り扱う場合には、数kmに及ぶ汀線変化から、数百m程度の海岸決壊を含む変動を対象として考察しなければならない。また、汀線変化の資料には局所的な変動も介入しているはずであるから、適当な間隔で移動平均して海岸侵食として考えられる現象を抽出しなければならない。したがって、erosional wave の波長を念頭において空間的に実測された時間間隔毎の汀線変化量を移動平均して、できれば、erosional wave の空間波形を見出すように、侵食現象の空間的な動態を調べるのが大切である。

この観点から、具体的には、最大1.2km程度の空間間隔に対して、種々の間隔で汀線変化を移動平均して現象

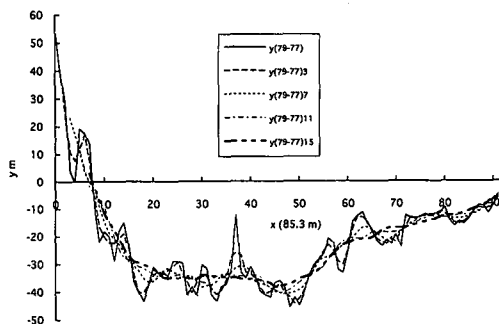


図-2 移動平均による汀線変化量の変動と空間波形

を考察する。この場合、さらに問題とすべきことは、そのような空間平均に対応する時間間隔をどのように選定するかということである。波浪など海岸侵食の外力に季節変化が存在するわが国のような海岸では、できれば時間間隔を1年として取り扱うことのできる定期に測量した結果を利用するのが適当と思われる。しかし、そのような理想的な資料は限定されているといわなければならないであろう。

まず、このような資料解析について、具体的に時空間間隔のとり方について検討するために、豊島ら(1981)の資料から、汀線変化量を85.3 m間隔に読み取り、3点、5点、7点、9点、11点、13点、15点および17点のそれぞれの移動平均で表わすと、図-2に示ようになる。図中、 $y(77-69)3$ は1969年から1977年までの汀線変化量の3点の移動平均を示し、河口からの距離を85.3 mを距離単位として x で表わしてある。これから3点の移動平均では、数百mのかなり規則的な変動と、13点以上の移動平均では、数kmの変化としてerosional waveとみなせる波形が見い出される。このことから、3点(170 m)および13点(1.02 km)程度の移動平均によって、汀線変化の変動とかなり広範囲にわたる波形(ここでは、erosional waveという)を見出すことができるものとして、その他の資料についても、ほぼ同程度の時空間間隔で資料解析する。

(3) 汀線変化の空間波形と変動

豊島らの資料について、このような移動平均した結果をそれぞれ重複させて図示すると、図-3のようになる。図中、 $y(79-77)15$ および $y(81-79)15$ から明らかなように、河口からの距離とともに空間波形が沿岸漂砂の方向に伝播することがわかる。ある空間にわたって汀線が後退する、いわゆるerosional waveを示す場合には、そのcrestの部分を含む空間波形が存在し、それに $y(79-77)3$ および $y(81-79)3$ のように、ほぼ周期的な変動が重なっているものと理解される。

宇多ら(1994)の資料を同様な方法で解析した結果を

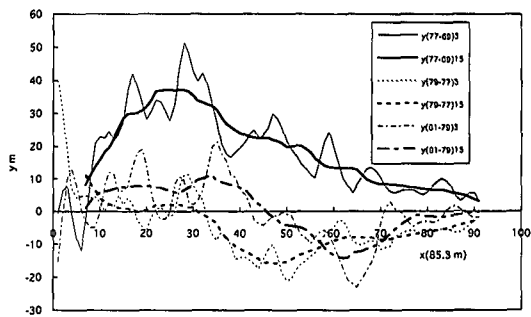
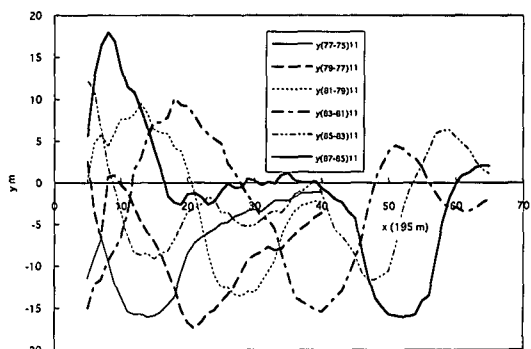
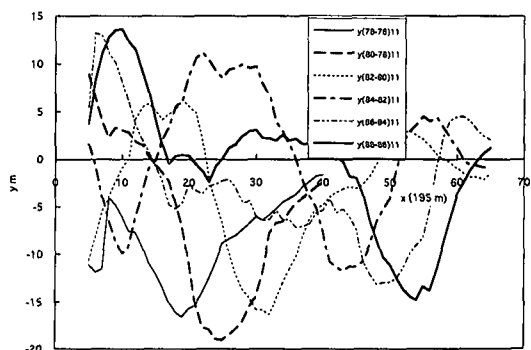


図-3 1969年から1981年の資料による汀線変化の空間波形と変動



(a)



(b)

図-4 1975年から1988年の資料による汀線変化

図-4(a)および(b)に示す。このうち(a)および(b)はそれぞれ1975年および1976年から時間間隔を2年とし、空間間隔を195 mとして読み取ったものを11点の移動平均したものである。読み取りの精度に若干問題があるが、これらから、数kmの空間波形とする伝播過程を明瞭に理解することができる。このことは宇多らの資料より以前の汀線変化を含む豊島らの資料による図-3とともに、比較的定形な空間波形として北進し、沿岸漂砂の方向に伝播していることがわかる。また、3点の移動平均によれば、豊島らの資料と同様に、数百mの変動

が存在し、それが沿岸漂砂の方向に北進していることも見い出された。

その空間波形には、前述したように汀線が後退する erosional wave として理解できるものと異なって、汀線が前進して堆積性を表わす、いわば accretional wave (このような英語はないので、ここでは negative erosional wave という) も存在し、それが同じ方向に伝播することが見い出される。このような erosional および negative erosional wave としての空間波形はほぼ相似しており、いわば定形波のようであるから、それらの crest の伝播として評価した位相速度を検討することができる。

これらの空間波形における crest の位置の経年変化を時間間隔を2年として表わすと、図-5 のようになる。図中に直線で示したように、erosional および negative erosional wave の伝播速度は両者に対して同一であることがわかる。

つぎに、1985 年以降の汀線変化を示す静岡県の資料を同様に解析した汀線変化の空間波形の変化を図-6(a) および (b) に示す。これは明らかに negative erosional wave として伝播しているが、1991 年頃になるとその波形に河口付近から汀線の後退を示す erosional wave が現われてきており、それらが沿岸漂砂の方向に伝播していると理解される。したがって、この erosional wave の伝播特性も図-5 に示してある。

図-5 に示した erosional wave または negative erosional wave の伝播特性を考察すると、つぎのことがわかる。まず、両者の伝播速度はほとんど同じであり、それらの現象が現われ始めた時期が存在することである。

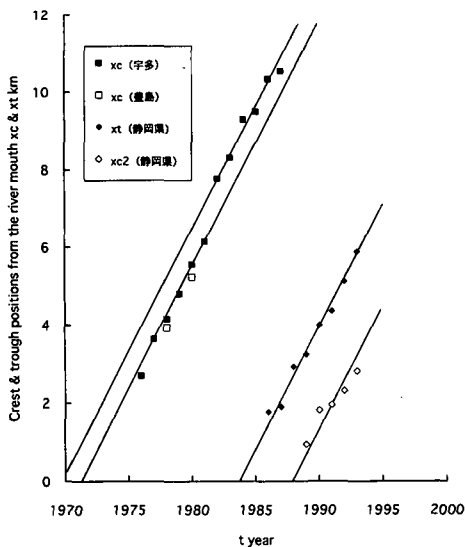


図-5 Erosional wave, negative erosional wave の伝播特性

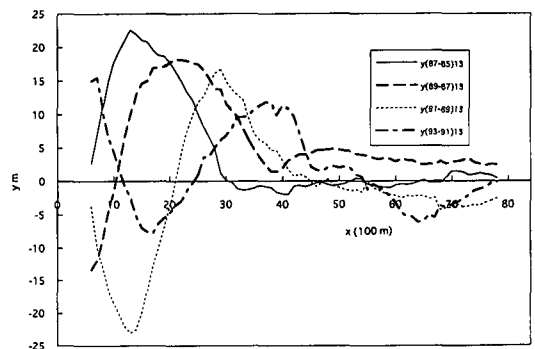
すなわち、最初の erosional wave の伝播を表わす2つの直線になぜ遅れが存在するのかかわからないが、それらを遡って延長すると、それらの波が発生した時期がわかる。それは1970年ころであると推定され、前述したように安部川からの漂砂源に大きな転機があった時期に対応する。

つぎに、1980年代になって negative erosional wave が発生し、現在、それが北進していることがわかる。それが発生したのは1983年ころであり、1987年ころには再び erosional wave が発生し、現在、北進していると理解できる。

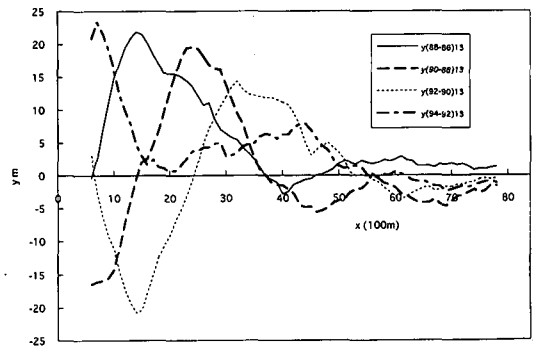
以上、数 km の空間波形をもつ汀線変化の伝播特性について述べたが、数百 m のものの伝播についても考察しなければならない。図-3, 4, 6 に示したように、これらも伝播しているようにもみられるが、これは離岸堤などの設置に伴う局所的な汀線変化を表わすとも考えられるので、構造物の配置とその変遷との関係でさらに調べなければならない。

3. 海岸侵食に伴う汀線変化の伝播

前述したような erosional wave の伝播が果たして理



(a)



(b)

図-6 1985年から1994年の資料による汀線変化の空間波形

論的に考えられるかどうかについて考察する。従来、海岸侵食に伴う汀線変化は、海浜変形の連続式に汀線変化による碎波角の変化を考慮した沿岸漂砂量の関係式を用いることによって、拡散現象を表わす方程式で記述されてきたが、ここでは Refaat ら (1991) による偏微分項を含む沿岸漂砂量方程式と海浜変形の連続式から、汀線変化を表わす方程式を誘導する。まず、沿岸方向に座標をとり、ほぼ一様な海浜を考えれば、その基礎方程式は若干の近似で、次式で与えられる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{h_0} \right)^2 = bgh_k^2 \left(\sin 2\alpha_{b0} - 2 \frac{\partial y_0}{\partial x} \right) - e \sqrt{\frac{g}{h_b}} Q \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)h_k} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 y_0 は基準線からの汀線変化量であり、 h_b は海浜変形の限界水深、 g は重力の加速度、 λ は空隙率であり、実用上、 a, b および e は定数と仮定できる。線形近似すれば、つぎのような波動・拡散現象を表わす方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2} + e \sqrt{\frac{g}{h_b}} \frac{\partial y_0}{\partial t} - \frac{\sqrt{2b}}{(1-\lambda)} \left(\frac{gh_k^2}{h_k} \right) \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} = 0 \quad \dots\dots (3)$$

基本解として、

$$y_0 = \eta_0 \exp(kx - \sigma t) \quad \dots\dots (4)$$

を考えれば、式 (3) の分散関係はつぎようになる。

$$\frac{\sigma/k}{\sqrt{gh_b}} = \sqrt{2b} \sqrt{\frac{h_b}{(1-\lambda)h_k}} \frac{1}{\sqrt{1 - e\sqrt{g/\sigma^2 h_b}}} \quad \dots (5)$$

すなわち、汀線変化における変動の波速は碎波水深で評価される長波の波速に関係し、碎波水深・海浜変形限界水深比および浅水比のようなパラメータが加わることになる。この関係を図示するために、式 (1) において等流状態のとき CERC の沿岸漂砂量式にほぼ一致するように係数を定めると、 $A=0.0021$ 、 $e=0.0086$ 程度の値になるので、式 (5) の関係を図示すると、図-7 のようになる。この場合の浅水比がどの程度の値をとるかはわからないので、直接の比較は困難であるが、これから得られる erosional wave の波速は前述したように定めた係数であるから図-5 に示したものとほぼ一致する。

一方、式 (1) において、左辺第 1 項を省略して連続式に代入すれば、従来用いられてきたつぎのような拡散型の方程式が得られる。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = \epsilon^2 \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} \quad \dots\dots (6)$$

ここに、

$$\epsilon^2 = \frac{2\sqrt{2b}}{e(1-\lambda)} \frac{h_b^2 \sqrt{gh_b}}{h_k} \quad \dots\dots (7)$$

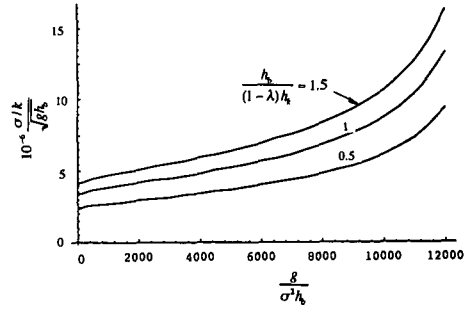


図-7 Erosional wave の分散関係と波速

この場合には、従来よく知られているように河口デルタの縮小による汀線変化は拡散現象として理解されてきたのである(たとえば、Refaat ら, 1991)。しかし、前述したように、安倍川河口海岸における汀線変化の時空間変化では、適当な移動平均操作では拡散現象のような汀線変化は現われず、むしろ波動性の方が卓越しているような結果となった。

4. 海岸侵食の原因とその伝播

以上述べた汀線変化における空間波形の伝播特性から、河口デルタ海岸における侵食原因との関係について考察する。前述したように、安倍川では 1968 年以前では漂砂源が著しく減少していたようであるが、これが直接河口海岸の汀線変化として現われたのであれば、拡散現象として河口デルタの縮小を考えることができる。しかし、河口デルタ海岸では、通常 submerged delta が形成されており、それが漂砂源の減少に対して直ちに影響を受けるはずである。河口部のみに注目して平均の汀線変化量を求め、その変遷を図-8 に示す。豊島ら、宇多ら、静岡県のそれぞれの資料について整理したこの結果によれば、明らかに経年的な変動があることがわかり、その変動値が極値をとった時期あたりで、図-5 に示した erosional wave, negative erosional wave が発生していることがわかる。このことは漂砂源の減少が submerged delta を変形させ、その局所的な沿岸漂砂量の変化による汀線変化が生じ、これが境界条件となって erosional

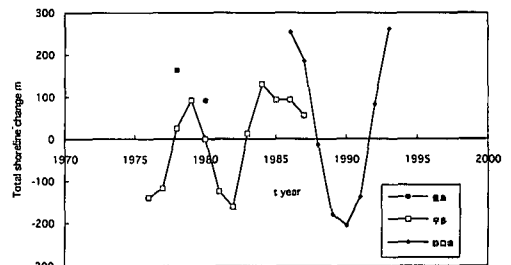


図-8 河口デルタにおける平均汀線変化量の変遷

wave, または negative erosional wave となって沿岸漂砂の方向に伝播していくのではないと思われる。

5. 結 論

以上、静岡海岸における海岸侵食に伴う汀線変化の時間空間変化を調べた結果、汀線変化は波動性を表わし、その伝播速度は erosional wave, negative erosional wave でも同じであり、ある侵食原因によってこれらが発生すると沿岸漂砂の方向に伝播することがわかった。その結果から、最初の erosional wave の発生は 1970 年ころであると推定され、漂砂源の変化の著しかった時期と対応することがわかった。

ついで、沿岸漂砂量方程式と海浜変形の連続式とから誘導された線形近似方程式によれば、汀線変化の現象は波動・拡散現象であり、その分散関係を検討するとともに、漂砂源の減少に伴う submerged delta の変形と erosional wave, negative erosional wave の発生との関係についても考察した。今後、このような波動・拡散現象として海岸侵食に伴う汀線変化を予測する方法の研究のみならず、海岸地形や各種の海岸構造物の設置との関

係から、さらに考察していくつもりである。

この研究を実施するにあたり、資料の提供を通じて、格別のご配慮をいただいた静岡県静岡土木事務所木村係長、海野主任、および(株)スルガコンサル技術部亀谷主任、調査部土屋主任に感謝するとともに、この研究は文部省科学研究費試験研究 (No. 07555164)、(財)河川環境管理財団補助金によって実施されたことを記して謝意を表明する。

参 考 文 献

- 宇多高明・山本孝次・河野茂樹 (1991): 砂嘴地形周りの海浜変形—三保松原を例として—, 地学, 第 13 巻, 第 2 号, pp. 117-134.
- 宇多高明・鈴木忠彦・大石守伸・山本吉道・板橋直樹 (1994): 静岡海岸の沿岸漂砂量およびその分布形の評価, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 536-540.
- 静岡県 (1994): 静岡海岸高潮対策測量調査.
- 豊島 修・高橋 彌・鈴木 勲 (1981): 静岡海岸の侵食特性について, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 261-265.
- Refaat, H. E. A. A. and Y. Tsuchiya (1991): Formation and reduction processes of river deltas; Theory and experiments, Bul., DPRI, Kyoto Univ., Vol. 41, pp. 177-224.