

九十九里海岸における地質年代スケールの沿岸漂砂量の推定

宇多 高明* ・高田 修** ・星上 幸良***
芹沢 真澄****・三波 俊郎*****・古池 鋼*****

1. ま え が き

侵食対策などの目的で各種海岸施設を建設する場合、それらの施設の効果や影響を十分予測することが求められる。とくに長期的視点に立った施設の効果や影響の評価が重要である。こうした場合、実用的にしばしば用いられる手法には汀線変化モデルや等深線変化モデルがある。これらの手法では、海岸線の最終安定形状は、海岸線に対する卓越波の入射方向との関係によって定まるために、当該海岸で海浜地形変化を決定する上で支配的な波向を知ることが重要になる。それと同時に、沿岸漂砂の境界条件についての、できる限り正確な情報が必要とされる。これらの情報を得るための最もオーソドックスな方法は波浪観測を行うことである。しかし、現地海岸では著しい地形変化を引き起こす波浪が欠測であったり、あるいは不規則波の作用と、現に存在する海浜地形との応答性が十分明らかでないために、そのまま予測に使えず、結果として過大な海岸線変化が生じてしまう例が多い。この点について、過去あるいは現存する海岸線の形状から卓越波向や沿岸漂砂の境界条件を逆算し、長期的な予測に用いる諸条件がほぼ妥当な水準にあることを確かめておくことは十分意義深いことである。なぜなら、工学的に大きくはずれた答えを予測してしまう可能性が減少するからである。本研究では、このような視点のもとに、千葉県九十九里海岸を例として考察する。

2. 波による地形変化の限界水深の推定

宇多 (1997) は、波の作用下で工学的に見て海底地形変化が見られなくなる限界の水深を、波による地形変化の限界水深 (h_c) と呼び、その全国実態を明らかにした。 h_c は各種侵食対策構造物の沿岸漂砂阻止効果などを評価する場合に重要なパラメータとなる。このことから、九十九里海岸についても h_c の推定を行った。推定手法

は、①平面等深線形状から推定するもの、および②時間的に繰り返し行われた海浜縦断測量から推定する方法である。

図-1 は、1985 年測量の太東崎周辺の深淺図である。図には、太東崎の南側と北側に矩形領域を定めてある。太東崎南側の区域 A の等深線形状に着目すると、太東崎と塩田川の南側に隣接する八幡岬の沖合は等深線形状が非常に複雑である。これは沖合に海食台 (露岩域) が存在するためである。両側を岬に囲まれた延長約 6 km の砂浜の北端部には夷隅川が流入し、海岸線は弓状に延びている。

一般に、規模の大きな構造物などにより遮蔽されていない、漂砂移動が活発な直線状海岸では、沿岸漂砂の作用によって、波による地形変化の限界水深より浅い区域の等深線はバー・トラフの形成を除けば平均的な海岸線

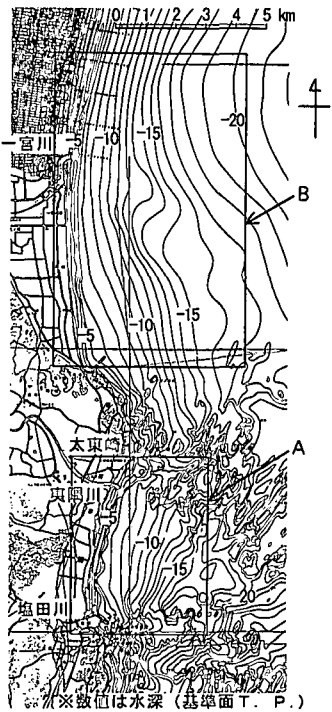


図-1 九十九里浜および和泉浦・日在浦海岸沖の海底形状

* 正会員 工博 建設省 土木研究所 河川部長
** 国際航業(株)
*** 正会員 国際航業(株)
**** 正会員 海岸研究室(有)
***** 海岸研究室(有)
***** 海岸研究室(有)

とほぼ平行になる。沖合のある等深線が沖向きに大きく突出している（あるいは凹んでいる）場合、海底面が砂で構成されているならば、沿岸漂砂の作用によって、その突出（凹み）地形は急速に均されてしまうからである。このような観点から図-1の区域Aを見ると、太東崎の沖合に続く露岩域に隣接した-12 mから-15 mまでの等深線が沖へ突出している。これに対して-10 m以浅の等深線は海岸線とほぼ平行に延びている。このことはこの海域での h_c は、少なくとも-11 m以浅にあることを意味していると考えられる。

同様に、図-1の区域Bの等深線形状を調べると、一宮川河口沖では-11 m以深の等深線が太東崎側では凹状、その北側では沖向きに大きく突出している。これらの等深線形状は-10 m以浅の等深線形状が沿岸方向にほぼ平行に延びている点と大きく異なる。このことは、この海域での h_c がほぼ-11 m以浅にあることを示してい

る。以上のようにして、波による地形変化の限界水深については、太東崎を挟んで同様な値が推定される。

図-2には1997年測量の片貝漁港周辺の海底地形を示す。片貝漁港の防波堤の先端部は「ハ」の字型の形状を有している。ここで、片貝漁港の北側に隣接する測線No.15における1985年から1992年までの海浜縦断形の変化を図-3に示す。この図によれば、地形変動は防波堤の先端付近の-4 mから-6 m付近で大きく、それより岸側・沖側で減少する。しかし沖合ではほぼ-9 mで地形変化は見られなくなる。このことから、この海岸での h_c はほぼ-9 mにあることが分かる。同様にして前浜で顕著な地形変化が見られなくなる限界の高さ h_R は約2 mにある。

3. 沿岸漂砂の会合点の推定

写真-1は、1999年における片貝漁港北側の海岸状況を示す空中写真である。この写真によれば、片貝漁港の北側では防波堤によって沿岸漂砂が阻止されたことにより三角形の安定した前浜が形成されている。そこで防波堤から北側に約1 km離れた地点において、平均海岸線への法線を立てると、法線の方角はN118°Eとなる。汀線が安定であることから、この角はこの地点への平均的な卓越波の波向に等しい。図-4は、国土地理院の

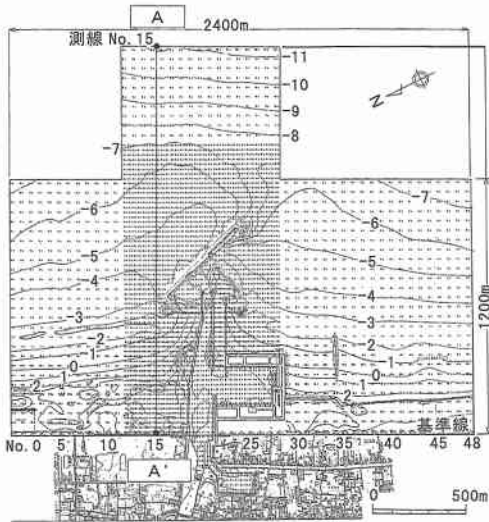


図-2 片貝漁港周辺の深浅図と測線配置

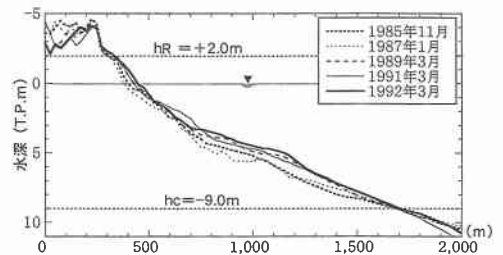


図-3 片貝漁港の北側に隣接する測線A-A'における海浜縦断形の変化



写真-1 片貝漁港周辺の空中写真（1999年撮影）

5万分の一地形図より九十九里海岸の海岸線形状を示したものである。図の点Pが先に海岸線への法線方向を定めた地点である。この地点は九十九里海岸の中央部から、やや南側に位置している。

図-4に示すように、九十九里海岸は全体として凹状の海岸線を有しているが、この地形図をもとに、北端の飯岡漁港付近から南端の太東漁港付近までの区域における海岸線への法線方向を調べると図-5となる。海岸線への法線方向角は、新川付近での $N 140^{\circ} E$ から一宮川の約 $N 95^{\circ} E$ まで全体的に緩やかに減少している。片貝漁港周辺で方向角が大きく変化しているのは防波堤や離岸堤による波の遮蔽域が形成され、そこで汀線形状が大きく変化していることによる。

九十九里海岸中央部では海岸線が緩やかに延びていることから波の屈折変形が小さいと考えられるので、図-5において片貝漁港上手側での方向角 $N 118^{\circ} E$ と等しい方向角を有する場所を定めると、片貝漁港の南約5 kmに位置する真亀川河口付近となる。各地点の海岸線への方向角が $N 118^{\circ} E$ より大きければ南向きの、小さければ北向きの沿岸漂砂が卓越することになり、その場合の沿岸漂砂の会合点はほぼ真亀川河口付近にあることになる。

次に、屈折計算を行ってより精度の高い会合点の推定を試みる。まず、片貝漁港での1997年の波浪観測統計より求めたエネルギー平均波(波高 $H_0=1.25$ m, 周期 $T=7.8$ s)に対して、卓越方向を求めるために、片貝漁港北

側の安定汀線に対して、沖合の水深約30 m地点から入射波向を 5° ピッチで変化させた屈折計算を行い、その中で片貝漁港北側の安定汀線と最もよく合う入射波向を求めた。この結果、卓越波向は $E 20^{\circ} S$ となった。さらに、この波が沿岸方向に入射するとして各地点での碎波角の沿岸分布を求めた。結果を図-6に示す。計算は片貝漁港から一宮川河口までの範囲で行ったが、これによれば碎波角が0となる、すなわち沿岸漂砂の会合点は真亀川の南3.5 km地点となる。この場所は屈折計算を行わずに海岸線形状のみから定めた漂砂の会合点の南約3.5 kmであるが、図-6によれば真亀川とこの地点における海岸線への法線の角度変化は 2° 未満と小さいので、ほぼ妥当な推定ができていると考えられる。

4. 地質年代スケールの沿岸漂砂量の推定

森脇(1979)は、九十九里浜の発達史を図-7にとりまとめ、縄文時代初期から古墳時代までの海岸線の変化を示した。これら各年代における旧海岸線のうち、縄文時代中期までは、現在九十九里浜として砂浜が発達している北部・南部では台地に沿って海食崖が発達していた。この状況では沿岸漂砂量の検討ができない。そこで現九十九里浜の北端から南端まで連続的な砂浜が形成された後で、最も古い時代の旧海岸線を選ぶと、縄文時代後期

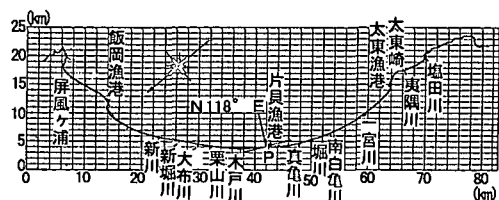


図-4 九十九里浜の海岸形状

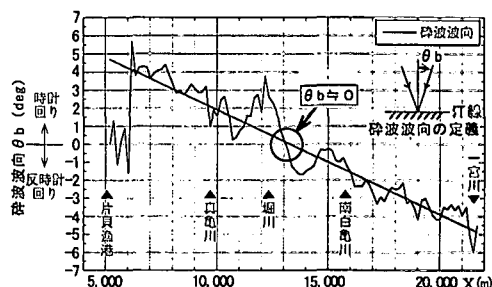


図-6 碎波角の沿岸方向分布

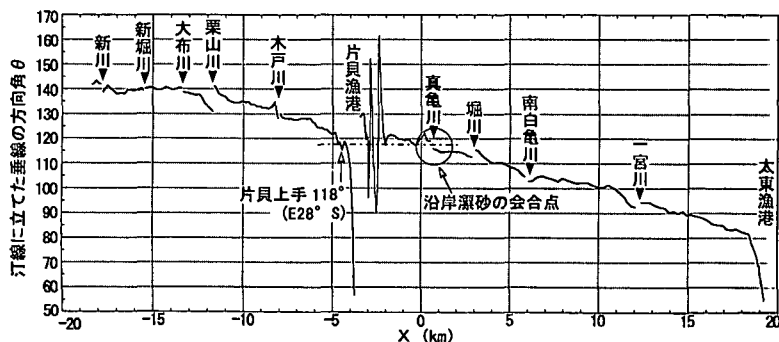


図-5 海岸線の方法角の沿岸方向分布と沿岸漂砂の会合点

※ θ はN方向を基準に
時計回りに測った角度

※国土地理院 1/50,000
地形図から計測

(4,000~3,000 年 B.P.)となる。そこでこの旧海岸線に着目し、この当時の海岸線形状と現在の海岸線形状から海岸線の変化量を算出したのが図-8である。これによれば、海岸線の前進量は九十九里浜の中央部では4,000 mであり、両側に減少する分布形状を有している。この海岸線の変化は約3,500年間、平均的に生じたと考えてよい。

各地点の沿岸漂砂量を Q とし、また、図-8に示す海岸線変化が与えられたとき、図-9に示す概念図より、任意の2地点にはさまれた区間 $x=x_1 \sim x_2$ について土砂収支を考える。両端からの流入土砂量と流出土砂量との差は、海浜堆積土砂量 ΔV に等しく、海浜堆積土砂量は前浜面積の増加量 ΔA に漂砂の移動高 h を乗じたものに等しくなるので、 ΔY を各地点の汀線前進量として、次式が成立する。

$$Q(x_1) - Q(x_2) = \Delta A \cdot h = h \cdot \int_{x_1}^{x_2} \Delta Y(x) dx \quad \cdots (1)$$

さらに式(1)で x_1 を任意の点とし、境界条件として x_2 を先に求めた沿岸漂砂の会合点 x_c とすれば、会合点では沿岸漂砂量が0であるから、次式となる。

$$Q(x) = h \cdot \int_{x_1}^{x_2} \Delta Y(x) dx \quad \cdots (2)$$

この式によれば、汀線前進量 ΔY の分布と漂砂の移動高 h が与えられれば沿岸漂砂量の分布が計算できる。そこで、 ΔY の分布には図-8を用い、漂砂の移動高 h が、近似的に図-3で定めた h_c と h_R の和に等しいとすれば11 mとなるので、これらをもとに沿岸漂砂量の沿岸方向分布を求めると、図-10となる。ここで沿岸漂砂量は式(2)で算出された値を $t=3500$ 年間で割って1年間当りの値として表示してある。図-10によれば、飯岡漁港では南下する方向に $4.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ の漂砂量であるが、片貝漁港付近では $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ にまで減少する。一方、堀川より南側では逆に北向きの沿岸漂砂が卓越し、最南端の現在太東漁港が立地する地点での沿岸漂砂の供給量は $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ であった。

5. 近年の地形変化からの沿岸漂砂量の推定

宇多(1997)は、 h_c から沿岸漂砂量のオーダーを見積もる式として、式(3)を示した。

$$Q = 780 h_c^{5/2} \quad \cdots (3)$$

ここに、 h_c (m)、 Q (m^3/yr)である。九十九里海岸の片貝漁港周辺では図-3に示したように、 h_c が約9 mであるからこの値を式(2)へ代入すると、沿岸漂砂量は $1.9 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ となる。この値は図-10から推定した沿岸漂砂量とオーダー的に等しい。

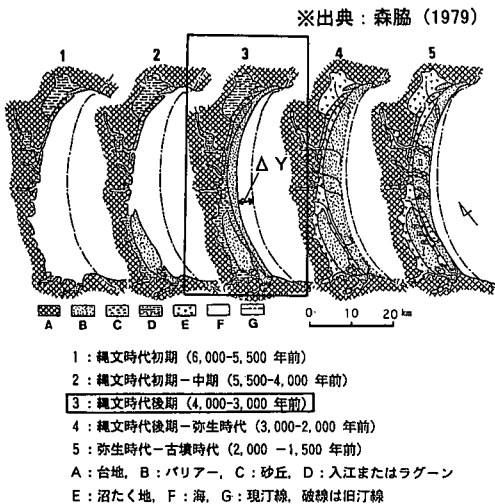


図-7 過去6,000年間の九十九里の発達史

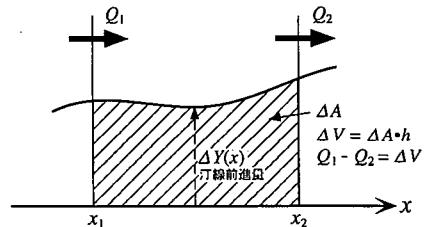


図-9 土砂収支の概念図

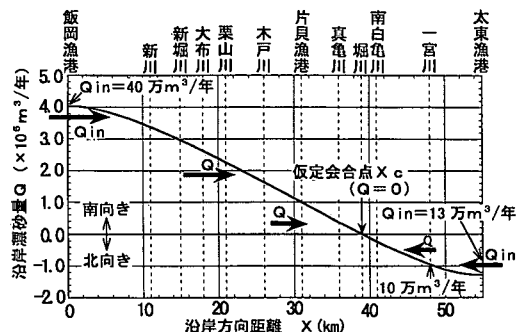


図-10 過去3,500年間の汀線変化量から推定した沿岸漂砂量の沿岸分布

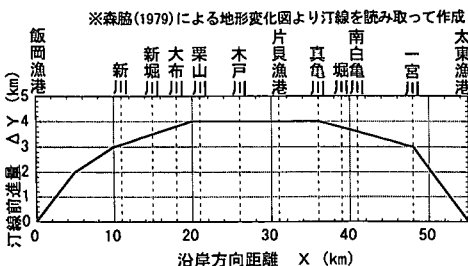


図-8 過去3,500年間の汀線変化量

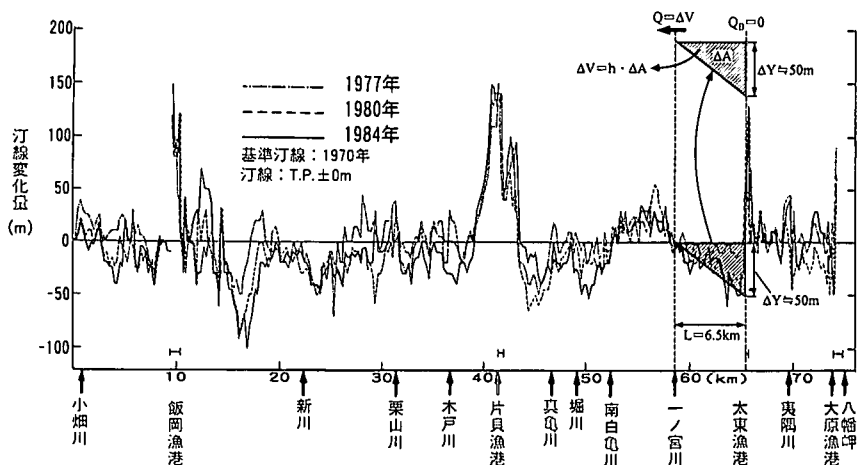


図-11 九十九里海岸の訂線変化図とそれに基づく一宮川河口地点における沿岸漂砂量の推定

宇多 (1997) は、空中写真をもとに、1977 年から 1984 年までの九十九里海岸の海岸線変化を図-11 のようにとりまとめた。九十九里海岸全体の海岸線の変化特性についてはすでに宇多 (1997) にまとめてあるので省略し、太東漁港と一宮川河口の間の海岸線変化に注目すると、図示するように太東漁港の防波堤による沿岸漂砂の阻止に起因して、沿岸漂砂の下手側において海岸線が三角形に後退している。この訂線後退域において、図のように太東漁港側からの漂砂供給量が 0、一宮河口から一定量の沿岸漂砂が流出という土砂収支を仮定すると、侵食土砂量の経時変化から沿岸漂砂量の推定が可能となる。三角形の侵食面積に片貝漁港の北側隣接域での海浜縦断形変化から推定した移動高 ($h=11$ m) を乗ずると、1970 年から 1984 年までの侵食土砂量は $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ となるが、この土砂が 14 年間に一宮河口を通過して流出したとすると、沿岸漂砂量は $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ となる。この値は地質年代スケールの海岸線変化から推定された太東漁港地点の沿岸漂砂量と一致している。

6. 考 察

本研究では、地質年代スケールの海岸線変化と、空中写真による近年の海岸線変化に基づいて沿岸漂砂量の推定を行う方法を示した。前者は、非常に長期間での平均化された沿岸漂砂量を与えるものであるが、これにより推定した沿岸漂砂量は、近年の海岸線変化から推定され

た沿岸漂砂量とよい一致を示した。このことは、近年の海岸線変化から推定された沿岸漂砂量によって、地質年代スケールまでの長期的な地形変化を説明することが可能なこと、そして長期的な沿岸漂砂量を推定する際に必要とされる漂砂の会合点の推定法がほぼ妥当なことを意味している。沿岸漂砂の会合点を推定する方法が妥当である点は、各種施設により海岸線を安定化させる場合に非常に重要な情報を与える。すなわち、時々刻々の波向は変化するが、構造物に挟まれた砂浜では、漂砂の会合点との位置関係から海岸線の変位量の大小関係が定められ、それによって海浜を安定化させるに必要な施設の種類・規模が変化するからである。

また、波による地形変化の限界水深と沿岸漂砂量の関係式から推定された沿岸漂砂量は、上述の 2. 方法から推定された沿岸漂砂量とオーダー的に一致しており、これらの手法から推定された沿岸漂砂量が少なくともオーダー的には誤っていないことが分かる。このこともまた海浜地形変化予測の際必要とされる有用な情報が得られたことを意味する。

参 考 文 献

- 森脇 広 (1979): 九十九里浜平野の地形発達史, 第四紀研究, p. 18, pp. 1-16.
 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, p. 442.