

砂浜に対する海面上昇の影響評価

三村 信男*・幾世 橋 慎**・井上 馨子***

1. はじめに

地球温暖化による海面上昇や気候変動が顕在化すれば、世界の沿岸域に広範で大きな影響が生じると懸念されている。影響の一つは自然海岸の地形や生態系などに対するものであるが、自然システムの複雑さのために定量的な評価はほとんど行われていない。そこで、本研究では砂浜に対する定量的評価へのアプローチを試みた。

砂浜の侵食が全国各地で問題化して久しい。その原因は漂砂源の喪失や沿岸漂砂の遮断、岸沖漂砂など地点毎に様々である。しかし、地球温暖化による海面上昇は、2100年までに30～110 cm (IPCC WG1, 1990) という時間スケールにおいても、また、全ての海岸に様に作用するという空間スケールにおいても従来の問題と大きく異なっている。そこで、本研究では、漂砂源や沿岸漂砂といった地域的な要因を無視し、検討の対象を海面上昇に対する海浜縦断地形の応答という2次元の問題に限定する立場をとった。以下では、最初に Bruun 則として知られるものをベースに縦断地形の応答の評価方法について検討し、ついで茨城県海岸の砂浜に対する汀線の後退距離、侵食面積などの試算の結果を示す。

2. 影響評価手法の検討

2.1 縦断地形変化に対する評価式

1) Bruun 則と Dean の式

沿岸漂砂による地形変化がないような砂浜の海面上昇に対する応答は、岸沖方向の海浜縦断地形の変化として生じる。海浜縦断地形は、海面が上昇すると上昇後の水位に対する平衡地形に向かって変化するため、水位上昇による静的な後退分以上に砂浜は侵食され、汀線が後退すると考えられる。

この様な考え方から、最初に汀線の後退をモデル化したのは Bruun (1962, 1988) であった。Bruun は、図1に示すように、海面の上昇によって、縦断地形は平衡地形を保ったまま上方及び岸側に移動する。この時、汀線

付近で侵食された土砂量と沖側に運ばれて堆積する土砂量とが等しい、として式(1)を導いた。

$$\Delta y = -S \frac{W_*}{(h_* + B)} = -\frac{S}{\tan \alpha} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 S は海面上昇量、 Δy は汀線の後退距離、 h_* は断面変化が生じる限界水深、 W_* は汀線から h_* までの岸沖方向距離、 B はバームの高さ、 $\tan \alpha$ は海浜の平均勾配である。

一方、海浜の平衡縦断地形には種々の研究があるが、最もよく知られているものの一つに、式(2)のような Bruun の式がある。

$$h = Ay^{2/3} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 y は汀線からの沖方向距離、 $h(y)$ は水深、 A は各海岸に固有の定数で、ここでは海浜断面係数と呼ぶことにする。

Dean (1991) は、海面下の縦断地形が式(2)で表され陸上では汀線で垂直にバームが形成されている地形(図1)に対して、Bruun と同様な考え方に基づいて、汀線の後退距離 Δy に対して式(3)を導いている。

$$\Delta y + \frac{3}{5} \frac{h_* W_*}{B} \left(1 + \frac{\Delta y}{W_*}\right)^{5/3} = \frac{3}{5} \frac{h_* W_*}{B} - \left(\frac{S}{B} W_*\right) \dots \dots \dots (3)$$

式(3)は $\Delta y/W_*$ が小さい場合式(1)に近似される。

2) Dean の式の修正

Dean の式(3)のもとになった海浜断面(図1)は陸側の地形がいきなりバームの高さで始まっており、実際の地形とはかけ離れている。そこで本研究では、汀線から前浜勾配 $\tan \beta$ で傾斜しバーム頂部で平坦面に接続する図2に示すような陸側の地形を考えた。この地形に対して Dean と同様の計算を行うと、汀線の後退距離 Δy は式(4)で与えられる。式(4)をここでは改良式と呼ぶことにする。

$$\frac{3}{5} A W_*^{5/3} - \frac{3}{5} A (W_* - \Delta y)^{5/3} - S W_* + B \Delta y + \frac{0.5 S^2 - S B}{\tan \beta} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

3) 護岸がある砂浜に対する評価式

我が国の砂浜の多くは、背後に護岸が建設されている。

* 正 会 員 工 博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科
 ** 学生会員 茨城大学大学院 工学研究科
 *** 茨城大学大学院 工学研究科

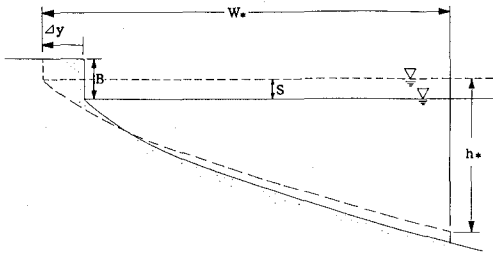


図-1 海面上昇に対する砂浜の応答 (Dean, 1991)

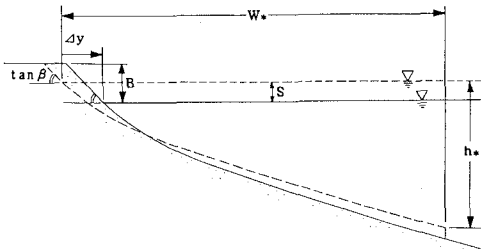


図-2 前浜勾配を考慮したときの砂浜の応答

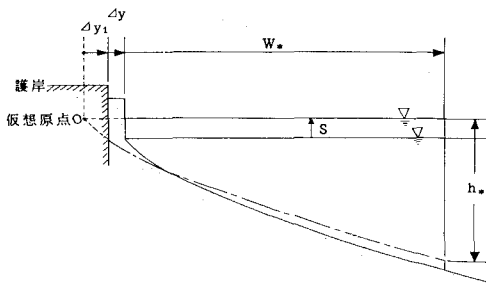


図-3 護岸前面での砂浜の応答

侵食が護岸に及んだ場合、岸側から供給される土砂がなくなるため護岸前面が深く侵食されることになる(図-3)。この場合の海面上昇後の海滨断面は、侵食量と堆積量とのつり合いが護岸より海側の断面で生じると考えることによって求められる。海面上昇後の平衡地形が平均海面と交わる地点を仮想原点とすれば、仮想原点から護岸前面までの距離 Δy_1 は、図-3のような Dean の用いた護岸前面の地形に対して式(5)で与えられる(Dean, 1991)。

$$\frac{3}{5}A(W_*^{5/3} - \Delta y_1^{5/3}) + B\chi - S(W_* - \Delta y_1) - \frac{3}{5}A(W_* - \chi - \Delta y_1)^{5/3} = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\chi = \Delta y - \Delta y_1$ は汀線から護岸までの距離(現在の砂浜の幅)である。

また、この場合も式(4)と同様に傾斜した前浜を考慮すると Δy_1 は式(6)であたえられる。

$$\frac{3}{5}A(W_*^{5/3} - \Delta y_1^{5/3}) + \frac{1}{2} \tan \beta \chi^2 - S(W_* - \Delta y_1) - \frac{3}{5}A(W_* - \chi - \Delta y_1)^{5/3} = 0 \quad (6)$$

このように仮想原点の位置が求まれば、式(2)を用いることによって護岸前面における水深を算定することが可能となる。

2.2 評価式の諸係数の決定法

1) 海滨断面係数 A

個々の海岸における平衡地形を表すためには式(2)の中の海滨断面係数 A を決めなければならない。対象とする海岸で十分な縦断地形測量のデータが利用できれば、これに最もよく適合するように A を決めればよい。

一方、A は主として底質の粒径と強い関係があると指摘されており、Moore は図-4 のように過去の研究成果を整理している(Dean, 1991)。実測データがない海岸ではこの図を用いて A を決めることになる。

茨城県沿岸の 19 地点における数回の縦断地形測量データと比較したところ、図-4 中に示すように、A は中央粒径の差にもかかわらず全て 0.1 前後の値を示し、Moore の与えた曲線とは一致しなかった。このことは、入射波など粒径以外の要因の影響や場所的な分布をもつ砂の代表粒径の決め方、縦断地形に対する沿岸漂砂の効果など、A を求める上で多くの検討課題が残されていることを示している。

2) 限界水深 h_* 、バームの高さ B、前浜勾配 $\tan \beta$

砂の移動限界水深は様々な移動形態に対して求められてきた。また、Dean (1991) の検討では、式(3)中の h_* は碎波水深にとられている。しかし、今回の研究では、現地における地形変化の沖側境界という定義から Halpermeir (1978) の式を用いることにした。また、バームの高さは武田・砂村 (1983) によって与えられた式を用いて算定する。

これらの式を用いれば限界水深 h_* とバームの高さ B は波浪条件によってきまる。両者は地形変化の沖側境界および陸側境界での地形の状態を表すものであり、海面

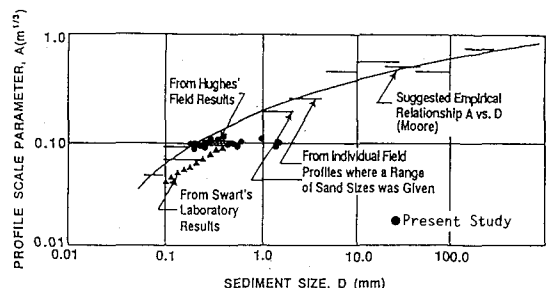


図-4 海滨断面係数と底質粒径の関係

上昇で生じる危険側の影響を評価できるように、それぞれに適切な波浪条件を設定するのが妥当であろう。そこで、後で示すケーススタディでは h_* を求めるときには最大有義波を代表波とし、静穏な波によって形成される地形であるバームの高さを求めるときには平均有義波を代表波として用いることにした。

改良式(4)、(6)の中の前浜勾配は、入射波と砂の中央粒径を与えることによって、Sunamura (1984) が提案した式によってきめることができる。

3. 茨城県の砂浜海岸に対する影響評価

3.1 茨城県の砂浜海岸

上で検討した評価手法を茨城県の海岸に適用し、影響評価を試みた。茨城県の海岸線は延長約 180 km であり、地形的には中央部の大洗岬を境に、南の鹿島灘海岸と北の常磐海岸とに大別される(図-5)。

海面上昇の影響を評価するためには砂浜の状態を細かく把握しなければならない。そこで、まず全県の海岸を 55 の区間に区分した。これらの区間をさらに海岸性状の違いによって 214 の小区間に分け、空中写真(平成 2 年撮影)や海岸台帳を用いて砂浜の延長と幅、背後の護岸・崖の有無などを読みとった。

図-6, 7 は、読みとりの結果を沿岸の 15 市町村別に示したものである。大洗以北では海崖が発達していて海岸線の中の砂浜の割合が相対的に小さく、以南の鹿島灘海岸では鹿島港の立地する鹿島、神栖両町を除いて海岸線のほとんどが砂浜である。図-7 をみると、砂浜の大部分に護岸や消波堤といった構造物が存在している。現状でも侵食に悩まされている海岸が多く、概して砂浜の幅は

小さい。

3.2 海面上昇のシナリオと入力データ

上に述べた 214 の小区間全てに対して、式(1)、(3)~(6)を適用し海面上昇による汀線の後退距離、砂浜の侵食面積、侵食されて海面下に輸送される土砂量(侵食土砂量)、さらに侵食が護岸や崖に及ぶ場合の前面の水深を算定した。

これらの評価式を適用するためにはいくつかのデータが必要である。まず、海面上昇量としては IPCC WG1 (1990) の予測に基づいて、0.3, 0.65, 1.0 m の 3 通りのシナリオを用いた。

海浜断面係数 A は、2.2 でみたように縦断地形の実測データがある地点ではそれから求まる値を用い、実測データのない地点では全て $A=0.1$ と仮定した。また、限界水深 h_* 、バームの高さ B 、前浜勾配 $\tan \beta$ の算定に必要

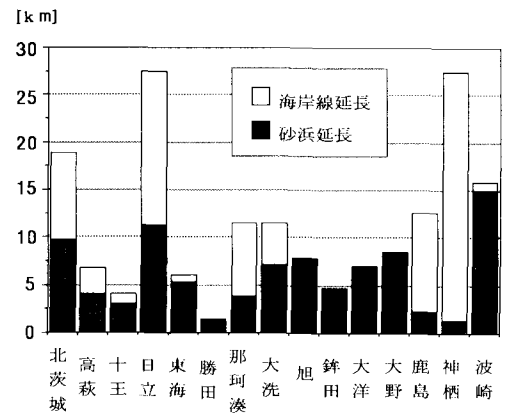


図-6 海岸線に占める砂浜延長の割合

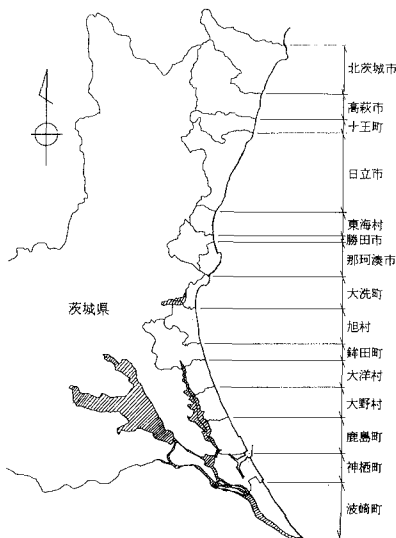


図-5 茨城県の海岸線 (ケーススタディ対象地域)

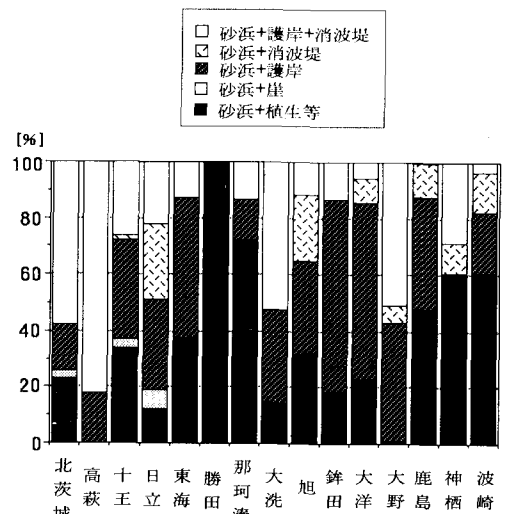


図-7 砂浜海岸の内訳

な入射波の条件は、小名浜、常陸那珂、鹿島における1981年から1990年までの10年間の観測データにもとづいてきめた。底質粒径は、茨城県の過去の種々の調査の中から拾いだし、データの無い25区間では底質を採取して測定した。

このように現状のデータを与えたということは、海面上昇以外には外力や底質の条件が現在と変わらないと仮定したことを意味している。

3.3 影響評価の結果

1) 汀線の後退距離

影響評価の最初に、汀線の後退距離の算定結果を示す。図-8は、55の区間に対して、1mの海面上昇量に対する後退距離を改良式(4)を用いて計算した結果である。ここで求められているのは、背後に護岸などが存在せず、砂浜の幅が無限にあると仮定した場合の汀線の後退距離、すなわち潜在的な後退距離である。

図-8をみると、55の区間のほとんどで100m前後の汀線の後退が生じるという結果になっている。1mの海面上昇に対する静的な汀線の後退距離は、ほとんど20~40mの間にあり、海面の上昇による付加的な侵食の効果が非常に大きいことがわかる。図-8において、中央から南部にかけて100mを大きく越える後退距離が現れているが、これらの地点では海浜断面係数 A が1.0より小さい。逆に、後退距離が90m以下になっている地点では A が1.0より大きく、海浜断面係数の値によって30m程度の差が生じている。

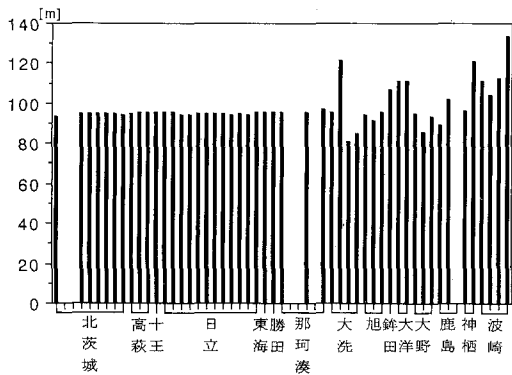


図-8 海面上昇による汀線の潜在的後退距離 (改良式)

表-1 各シナリオに対する汀線の平均後退距離と総侵食面積

海面上昇量 (m)	平均後退距離 (m)				総侵食面積 (km ²)		
	静的後退	BRUUN式	DEAN式	改良式	静的後退	DEAN式	改良式
0.3	9.49	28.73	28.92	30.05	0.85	2.49	2.57
0.65	20.57	62.26	63.17	65.40	1.75	4.34	4.41
1.0	31.64	95.78	97.98	101.04	2.57	5.10	5.16

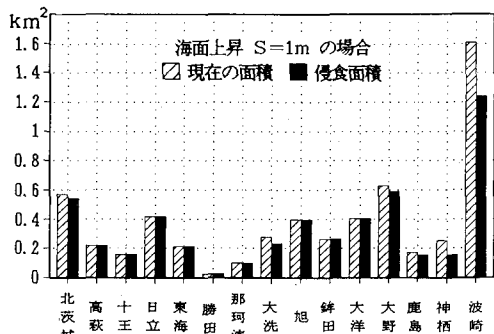


図-9 市町村別の砂浜の侵食面積 (改良式)

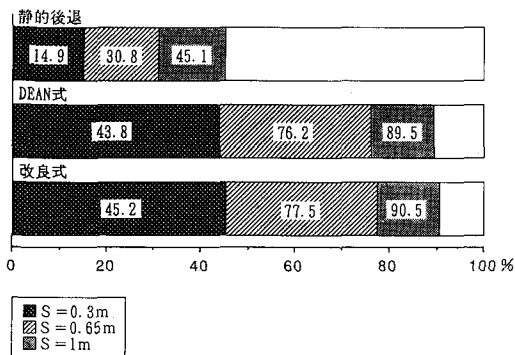


図-10 茨城県の砂浜総面積に対する侵食面積の割合

表-1に、3つの海面上昇シナリオに対する汀線の静的な後退距離とBruunの式(1)とDeanの式(3)、修正式(4)による算定結果の平均値を示す。これによると、3つの式の結果の間の差は小さく、いずれも静的な後退距離の3倍以上の侵食が生じるという結果を与えている。

2) 侵食面積と侵食土砂量

上で求めたのは潜在的な汀線の後退距離である。しかし、現実には砂浜の背後に護岸や崖が存在するため、汀線は砂浜の幅以上に後退できない。侵食面積の算定ではこうした効果を考慮した。214の小区間1つずつについて潜在的な後退距離と砂浜の幅とを比べて実際の後退距離を求め、それに砂浜の延長を掛けて侵食面積を求めた。こうして求めた侵食面積を沿岸の15市町村毎に集計した結果を図-9に、茨城県全体の集計結果を図-10と表-1に示す。これらの図は1mの海面上昇に対するものであるが、海面上昇によって茨城県の砂浜に非常に大きな影響が生じることを示している。

今回の計測結果によれば、現在茨城県全体で約5.7km²の砂浜が存在している。改良式に基づくと0.3, 0.65, 1.0mの海面上昇によってそれぞれ45.2%, 77.5%, 90.5%の砂浜が消失することになる。図-9に示され

ているように特に大洗以北の常磐海岸では1mの海面上昇によってほぼ完全に砂浜がなくなることになる。

この結果を侵食土砂量でみてみよう。侵食土砂量の算定結果は前浜の地形をどのように仮定するかで大きく異なるが、図-2のような改良式に用いた地形に対する結果を示すと、3つの海面上昇のシナリオに対して、各々、670万 m^3 、1200万 m^3 、1600万 m^3 程度という膨大な量に達する。茨城県一県だけでこの量であり、日本全国で同様な試算を行った場合極めて膨大な量になる。海面上昇に対する対応策の一つとして養浜をするという考え方があるが、砂浜全体に対する対策としては非現実的という他ない。

3) 護岸前面の水深

海面上昇量が大きくなるにつれて侵食は背後の護岸や崖に到達する。1mの海面上昇に対して護岸前面の水深は茨城県沿岸の全域で0.27m~2.31mになっている。護岸前面の砂浜が失われ、前面の水深が大きくなれば、波のはい上がり高さや越波量が著しく増大し、背後の陸上部にも大きな影響が生じるようになると懸念される。

4. おわりに

本研究では海浜縦断地形の応答という視点から、海面上昇の影響に対する定量的評価手法を検討した。ついで、茨城県の沿岸域のデータをなるべく詳細に収集し、それに基づいて評価手法の適用をはかった。その結果、1mの海面上昇によって茨城県の砂浜の90%が消失するなど、極めて重大な影響が現れるという結果を得た。砂浜の侵食は現在でも全国的に問題となっているが、海面上昇が実際に生じればこの問題を一挙に異なるレベルにまで深刻化させる要因になると懸念される。

はじめにも述べたように、今回の検討では沿岸漂砂な

ど個々の地点における固有の問題は無視しており、全国で一様に生じる基底的な海面上昇の影響を検討したものである。一方で、沿岸漂砂の卓越する海岸では海面上昇の効果は小さいという字多ら(1991)の報告もある。漂砂源への影響、沿岸漂砂の変化、入射波浪の変化など他の要因の変化が加わった場合、どのような事態が生じるのかに関する定量的評価は今後の課題である。

今回の研究を進めるにあたって茨城県沿岸の航空写真や深浅測量データ、底質粒径等のデータは茨城県河川課と港湾課から提供していただいた。また、本研究は2件の文部省科学研究費総合研究(A)(代表 渡辺 晃東大教授、及び代表 松尾友矩東大教授)から援助を受けた。記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 武田一郎・砂村継夫(1983): 砂浜海岸の堆積過程における地形変化, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 254-258.
- 宇多高明・山本幸次・岡本俊策・河野茂樹(1992): 駿河海岸の過去9,000年間における海浜変形の再現計算と将来予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 426-430.
- Bruun, P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. Waterways and Harbors Div, ASCE, 88 (WW1), pp. 117-130.
- Bruun, P. (1988): The Bruun Rule of erosion by sea level rise: A discussion of large-scale two- and three-dimensional usages, J. Coastal Research, 4, pp. 627-648.
- Dean, R. G. (1991): Equilibrium beach profiles: characteristics and applications, J. Coastal Research, 7 (1), pp. 53-84.
- Hallermeier, R. J. (1981): A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, Coastal Engineering, 4, pp. 253-277.
- IPCC WG1 (1990): Climate Change—The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, 365 p.
- Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach-face slope, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242-245.