

海岸保全施設としての砂浜の確率論的手法による変動量評価

福島雅紀*・鳥居謙一**・田中茂信***

1. はじめに

1999 年 5 月に海岸法が改正され、消波機能等を有する砂浜を海岸保全施設として指定することが可能となった。指定にあたって海岸管理者は、消波施設としての砂浜や堤防の基礎地盤としての砂浜の範囲を設定することとなるが、指定される砂浜は安定的に確保されることが必要となる。しかしながら、天然の砂浜は常時来襲する波浪によって絶えず変動を繰り返しており、その変動量について理解しておくことが、海岸保全施設としての砂浜を指定する上で重要となる。

そこで本研究では、阿字ヶ浦漂砂観測栈橋（以下、栈橋）において 1977 年 1 月から 1996 年 3 月にかけて観測された断面測量の資料を用いて、その汀線変動特性を調べた。ここでは変動特性として汀線変動量を考え、水文学や波浪統計の分野において開発されてきた極値統計解析の手法を用い（Stedinger ら, 1993; 合田, 1997）、年超過確率数十分の一の汀線変動量を求めることとした。さらに、阿字ヶ浦の結果を参考にして、いくつかの建設省直轄海岸の汀線変動量についても言及した。

2. 海岸保全施設としての砂浜

2.1 定 義

海岸法においては、海岸保全施設としての砂浜は「海岸管理者が消波等の海岸を防護する機能を維持するために設けた砂浜で、指定したものに限る。」と定義されており、以下の場合が考えられる。

- 1) 工作物を設置するとともに、養浜により設けた砂浜
- 2) 工作物により保全される、もしくは堆積した砂浜
- 3) 養浜のみで維持していく砂浜

以降、“砂浜”と表現した時には“海岸保全施設としての砂浜”を表すものとする。

2.2 砂浜の目的・機能・性能評価

天然の砂浜の変動量を調べるにあたり、砂浜の目的・機能・性能を防護・環境・利用面から表-1 に整理した。

表-1 砂浜の目的・機能・性能

目的	機 能	性能評価手法	性能評価諸元
防護	・越波防止機能	打ち上げ高・越波量の低減率、安定性*	底質特性(粒径*, 形状*, 比重), 断面形状*, 平面形状
環境	・水質浄化機能 ・生物の生息空間機能 ・景観機能	浄化率, 生物の生息状況, 景観阻害度	底質特性(粒径*, 形状*, 比重, 色), 断面形状*, 平面形状
利用	・海水浴場としての機能 ・漁場としての機能 ・祭りの場としての機能	利便性, 快適さなど	底質特性(粒径*, 形状*, 比重, 色), 断面形状*, 平面形状
その他	・堤防等の構造物基礎としての機能	地盤支持力, 洗掘量, 安定性*	底質特性(粒径*, 形状*, 比重), 断面形状*

* 断面形状…バー, バーム, 前浜勾配, 後浜高さ, 前浜幅など
* 粒径…中央粒径, 均等係数, 曲率係数など
* 形状…円形度 (円磨度), 扁平度など
* 安定性…汀線変動幅, 前浜変動幅など

海岸保全施設の前提条件となる防護の点で、また堤防等の基礎となる点において、砂浜は変動が少なく安定していることが重要であることがわかる。

ここで、砂浜を指定する際に天然の砂浜の変動量を理解することがどのような意味を持つかを述べておく。図-1 は、それを説明するためのイメージ図である。何らかの原因により、(a) 図のように海浜断面が侵食されたとする。このとき、海浜断面の減少により打ち上げ高が増大し、何らかの対策が必要となる。そのような海岸に養浜を行う場合、(b) 図に太線で示すような海浜断面が必要となる。この断面は、堤防法線上で堤防天端高を超えないように計画される。しかしながら、実際の施工においては、この断面を確保するだけでは十分ではない。1 節で述べたように、砂浜が常時変動しているからであ

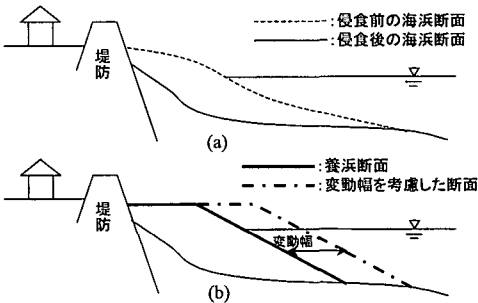


図-1 変動幅設定のイメージ

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川部海岸研究室研究員
** 正会員 工修 建設省土木研究所河川部海岸研究室長
*** 正会員 工修 建設省中部地方建設局豊橋工事事務所長

る。例えば、30年間維持できるような施設として砂浜を考えるならば、年超過確率 $1/30$ の変動幅を余裕幅として持つ計画海浜断面を設定すべきである。

3. 天然の砂浜の変動量評価

3.1 阿字ヶ浦海岸の汀線変動データ

天然の海岸において、長期にわたる断面測量が実施されてきた海岸は非常に少ない。桟橋では約20年間にわたり毎週断面測量が実施されてきた(山本ら, 1999)。図-2は、その測量結果から算定した汀線位置(X_s)の経時変化を示す。1977年から1979年の約3年間に相当する0週から150週にかけて、汀線は急激に後退し、その後の十数年間で徐々に前進しながら、ほぼ初期汀線の位置まで回復している。長期の変動成分の上に短期的な変動成分が乗っている様子を確認できる。以下では、この1003個のデータからなる時系列を資料として用い、砂浜の変動量、特にその後退量について極値統計解析を試みる。ここで、後退量は平均汀線からの侵食量とした。

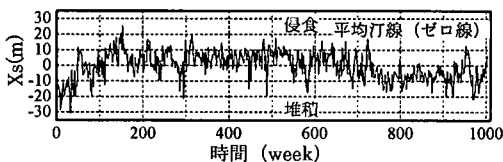


図-2 阿字ヶ浦海岸の汀線位置の経時変化

3.2 評価手法

確率統計解析を行う際の前提条件は、標本がランダム性、独立性、均質性、斉次性を有することである。ランダム性に関しては、明らかに人為的な影響を含む資料を取り除いた上で、汀線変動がある確率法則に従って生じる確率変数であると仮定する。次に、斉次性を確保するためにフーリエ解析により図-1の時系列から周期成分を事前に除去し、独立性を確保するように極値のみ抽出する。均質性については満たされているものと仮定する。水文学の分野では、その対象となる資料には種々の問題が含まれていることもあり、独立性、均質性を仮定して解析を進めることも提案されている(賈, 1998)。

資料となる時系列から標本を作成する際には、ある期間の最大値のみを取り扱うものとする。前者は一般的に年間の最大値をとる場合が多く、年最大値資料(以下、AMS)と呼ばれ、後者は部分的資料(以下、PDS)と呼ばれる。後者は、閾値をどのように設定するかが問題となるが、短期間の観測により大きな標本が得られ、短期間の資料を解析する上で有効な手段となる(田中・賈, 1999)。

本解析で取り扱うデータは約1000個の19年間分の

データがあり、海岸における観測では非常に長期間のデータを有しているが、水文統計学の世界から見ると比較的短期間のデータしか持ち合わせていないと見える。そこで、以下ではAMSの解析結果も示すが、PDSとの比較として示すものとし、AMSの資料として用いるためには観測期間が短すぎることを述べておく。

約20年間の資料があり20年以上の再現確率を持つ確率点も推定しようとしているので、確率分布モデルを用いる必要がある。確率分布モデルは極値統計理論に基づく分布モデルとし、AMSについては2母数のグンベル分布(以下、Gumbel)、3母数の一般極値分布(以下、GEV)、PDSについては2母数の指数分布(以下、EXP)、3母数の一般パレート分布(以下、GP)を用いる。各分布の累積分布関数については次節で説明する。AMSについては上述した分布以外に、指数分布、平方根指数型最大値分布、対数ピアソンIII型分布、対数正規分布などの確率分布モデルを仮定した検討も行ったが、以下で示す結果以上に精度の良い確率点の評価はできなかった。

統計資料の標本が与えられ確率分布モデルが仮定された時、その標本の母集団の特徴を最も的確に表すように累積分布関数を求める作業が母数推定である。ここでは積率の新しい概念として導入されるようになってきたL積率とPWM(Probability weighted moments)を用いる。不偏PWM推定値を標本から算定し、L積率と不偏PWM推定値の関係、母数とL積率との関係から母数を推定する。積率法による母数推定を行う場合には不偏性の問題が生じるが、L積率を用いた場合にはその問題が緩和されると言われている(Stedingerら, 1993; 竹内ら, 1997)。また、EXPおよびGPに対するL積率も求められているため、PDSに応用する上でも問題はない(Stedingerら, 1993)。

3.3 AMSとPDSの関係

AMSとPDSの事象の頻度の間には、いくつかの一般的な関係が存在する(田中・賈, 1999)。PDSについて、 λ を閾値 x_0 を上回る事象の1年当たりの平均発生回数とする。 $G[x]$ は、事象が x を下回る確率、すなわち $[x_0, x]$ の範囲をとる確率とする。 $x_0 \leq x$ となる任意のレベル x について、1年あたりの平均発生率は次式で表される。

$$\lambda^* = \lambda(1 - G[x]) \cdots \cdots (1)$$

対応するAMSに関する累積分布関数 $F_a[x]$ は、ある年に関する年間最大値が x を超えない確率である。独立事象については、1年間を通じて x を超過しない確率はポアソン分布によって与えられ、次式で表される。

$$F_a[x] = \exp(-\lambda^*) = \exp[-\lambda(1 - G[x])] \cdots (2)$$

式(2)から年最大事象に関する累積分布関数とPDS

に関する発生率および分布との関係が明らかになる。再現期間を T_a とすると、年超過確率 $1 - F_a[x]$ は $1/T_a$ で表される。PDSにおいて、これに対応する超過確率 $1 - G[x]$ を q_e とすると、式(2)は式(3)のように表すことができる。ここに、 $T_p = 1/\lambda q_e$ はPDSにおけるレベル x に関する再現期間である。 T_p について式(3)を解くと、式(4)の関係式が得られる。PDSにおいては、1年に起こりうる事象は1を上回るため、 T_p は T_a よりも小さい。

$$\frac{1}{T_a} = 1 - \exp(-\lambda q_e) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{T_p}\right) \quad \cdots \cdots (3)$$

$$T_p = -\frac{1}{\ln(1 - 1/T_a)} \quad \cdots \cdots (4)$$

式(3)によって x を上回る事象の平均発生率 λq_e は、AMSにおける年超過確率 T_a に変換される。 $T_a > 10$, すなわち発生頻度の低い事象については、年超過確率 $1/T_a$ はPDSに関する平均発生率 λq_e にほぼ等しくなる。したがって、 $T_a \approx T_p$ となる。

式(2)において、閾値 x_0 を超える事象の累積分布関数が次式で表されるGPで与えられるとすると、

$$G(x) = 1 - \left[1 - \kappa \left(\frac{x - x_0}{\alpha}\right)\right]^{1/\kappa} \quad \cdots \cdots (5)$$

κ が正の時には上界 $x_{\max} = x_0 + \alpha/\kappa$ を持ち、 κ が負の時には非有界であり長く尾を引く分布となる。 $\kappa = 0$ の時は、式(6)のようなEXPとなる。

$$G(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x - x_0}{\alpha}\right) \quad \cdots \cdots (6)$$

式(5)を式(2)に代入すると、 x_0 を上回るAMSに関するGEVが式(7)のように得られる。 $\kappa = 0$ の時はGumbelとなり、式(8)で表される。

$$F_a(x) = \exp\left[-\left(1 - \kappa \frac{x - \xi}{\alpha^*}\right)^{1/\kappa}\right] \quad \kappa \neq 0 \quad \cdots \cdots (7)$$

$$F_a(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - \xi}{\alpha}\right)\right] \quad \cdots \cdots (8)$$

$x \geq x_0$ の時、変換パラメータ ξ および α^* は次のように定義される。

$$\left. \begin{aligned} \xi &= x_0 + \frac{\alpha(1 - \lambda^{-\kappa})}{\kappa}, \alpha^* = \alpha \lambda^{-\kappa} & \text{for } \kappa \neq 0 \\ \xi &= x_0 + \alpha \ln(\lambda) & \text{for } \kappa = 0 \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (9)$$

この一般的なポアソン-パレートモデルは柔軟性が大きく、多くの現象について妥当なモデルとなっており、形状母数 κ はAMSとPDSとで互換的に使用できる。これらのパラメータを実際に求める場合、発生率 λ は1年あたりの x_0 を超過する平均回数といった単純な方法で推定できる。その他のパラメータは以下の関係より算出される。

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \frac{\mu - x_0}{\lambda_2} - 2, \alpha = (\mu - x_0)(1 + \kappa) & \text{for } \kappa \neq 0 \\ \frac{1}{\beta} &= \alpha = \mu - x_0 & \text{for } \kappa = 0 \end{aligned} \right\} \quad \cdots (10)$$

ここに、 $\mu = \lambda_1$ は標本の平均であり1次L積率、 λ_2 は2次L積率、 β は指数分布の尺度母数である。

3.4 解析結果

図-3(a)は、図-2の時系列について、斉次性を取り除くように5年以上の変動成分を除去し、それより短い変動成分のみを示したグラフである。図-3(b), (c)は図-3(a)の時系列からそれぞれAMSおよびPDSとした値に灰色の丸印を付けて示したものである。(b)では毎年の最大後退位置に丸印が付されており、標本数は19個である。(c)では、ゼロ点を横切って後退し、次にゼロ点を横切って前進し始めるまでの間の最大後退位置に丸印が付されており、標本数は131個となった。扱う資料によっては、PDSを作成する際の閾値の決定が困難な場合があるが、ここでは閾値をゼロとしてPDSを作成した。

図-4は、PDSをCunnaneのプロットングポジションに従って指数確率紙へプロットしたものである(黒丸)。また、L積率法による母数推定を行い、GPおよびEXPに当てはめた結果も示す。図-5は、AMSをCunnaneのプロットングポジションに従ってGumbel確率紙へプロットしたものである(黒丸)。図-4と同様の方法により、GumbelおよびGEVに当てはめた結果も示す。確率紙へプロットした時の直線性は、AMSに比べPDSの結果の方が良く、より精度の高い推定ができてい

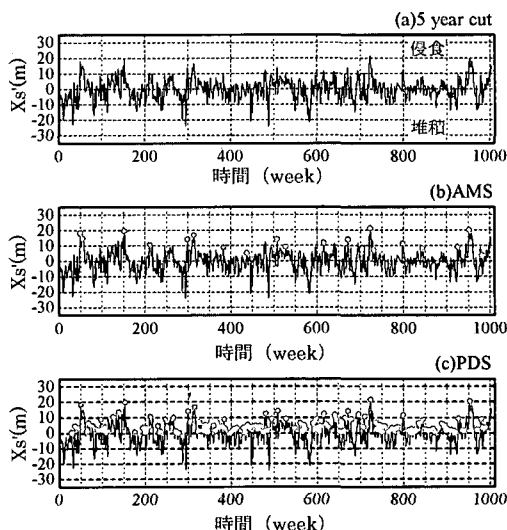


図-3 長周期成分を除去した汀線位置の経時変化(灰色の丸印が標本としたデータを表す。)

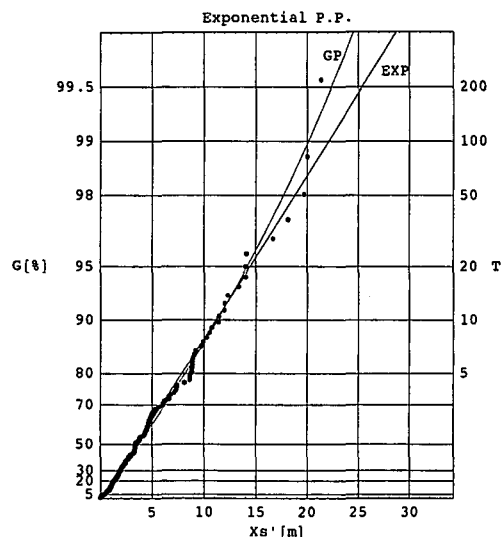


図-4 PDSの指数確率紙へのプロットおよび分布モデルへの当てはめ

と考えられる。ここで、図-4の T は再現期間ではなく、前記した記号により表現すると $1/q_e$ となる。

図-6は、長周期成分を除去した効果を見るために、長周期成分を含んだデータからPDSを作成し、それについて図-4と同様な解析を試みた結果を示したグラフである。 $X_s=10$ m付近において黒丸の並びから判断される勾配が大きく変わっており、統計解析を行うための標本としては好ましくないことがわかる。当てはめられた関数も極値統計解析では重要となる X_s が大きい領域で、分布モデルとのずれが大きくなっている。

表-2には、図-4, 5に示された結果について汀線後退

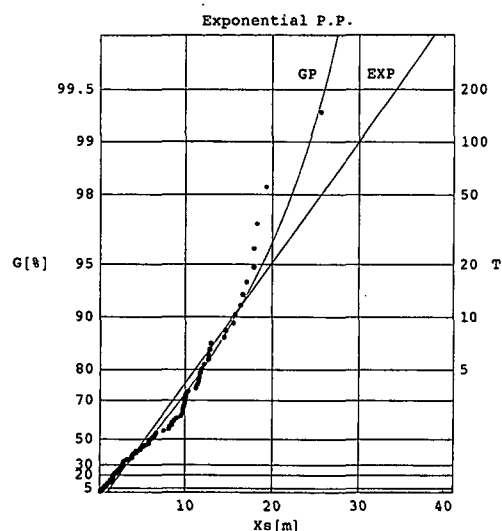


図-6 長周期成分を含む資料から作成したPDSの指数確率紙へのプロットおよび分布モデルへの当てはめ

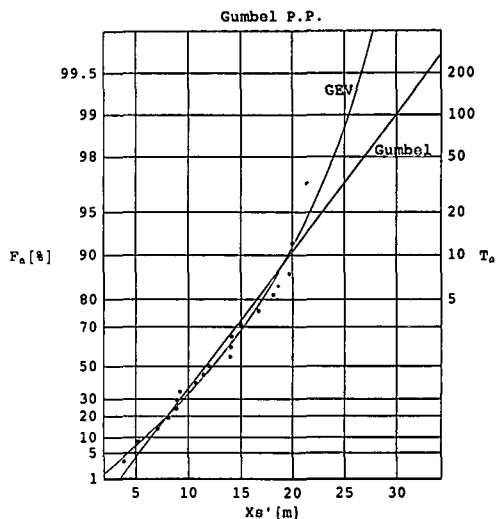


図-5 AMSのグンベル確率紙へのプロットおよび分布モデルへの当てはめ

量の確率点が整理されている。このとき安定性と適合度を評価するために、jackknife法による推定値および推定誤差、変動係数、相関係数(以下、COR)、標準最小二乗規準(以下、SLSC)が示されている。ここで、変動係数は推定誤差を推定値で割った値であり、推定値と推定誤差が小数点以下を四捨五入して記述されているので、表に示された数値を用いて計算すると、多少の違いが生じるかもしれない。SLSCは式(11)、(12)で定義され、標本に対する推定値の適合度を表す(寶, 1998)。

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|S_{0.99} - S_{0.01}|} \quad \text{.....(11)}$$

$$\xi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2 \quad \text{.....(12)}$$

ここで、 $S_{0.99}$ 、 $S_{0.01}$ はそれぞれ非超過確率0.99と0.01に対する確率分布の標準変量、 s_i は順序統計データを推定母数で変換した標準変量、 r_i はプロットング・ポジションに対応した標準変量である。

安定性の面では、EXPの方がGPよりも精度の良い結果が得られている。適合度に関しては、母数の数が多いほど適合性がよくなるが、2母数のEXPでも3母数のGPに近い適合度が得られている。これらのことを考慮して、ここではEXPの結果を採用すると、阿字ヶ浦海岸における年超過確率1/30の汀線後退量は25 m程度と算定された。太平洋側の細砂で構成される天然の砂浜について、その汀線変動量が示されたことにより、今後計画海岸断面を決定する上で重要な情報となるであろう。

3.5 全国直轄海岸への応用

実際には、全国の海岸の汀線変動量が得られることが望ましい。建設省直轄海岸においては、年に1~2回の

表-2 AMS および PDS を用いた解析結果

(単位: m, 変動係数, SLSC, COR には単位なし)

	T_a (年)	GEV	Gumbel	GP	EXP
確率点	10	20	20	19	20
	20	22	23	21	24
	30	23	25	22	25
	50	24	27	24	28
推定値	10	20	20	18	20
	20	22	23	21	24
	30	23	25	22	25
	50	24	27	23	28
推定誤差	10	2	2	2	2
	20	2	2	3	2
	30	2	2	4	2
	50	2	2	4	2
変動係数	10	0.077	0.083	0.123	0.084
	20	0.075	0.086	0.148	0.084
	30	0.079	0.087	0.163	0.085
	50	0.090	0.090	0.182	0.085
SLSC		0.031	0.043	0.020	0.023
COR		0.992	0.975	0.997	0.994

表-3 建設省直轄海岸の測量データに基づいた年超過確率 1/30 の汀線後退量

(単位: m)

	構造物無し		構造物有り	
	粗砂	細砂	粗砂	細砂
太平洋側	22	25		
日本海側	20	34		20

阿字ヶ浦海岸の汀線変動データを天然の砂浜のデータとして用い、AMS および PDS による統計解析を行い、汀線変動の確率点を算定した。フーリエ解析により周期成分を除去することで斉次性を確保し、さらに PDS を使用することで、誤差の少ない確率点の評価が可能となった。その結果、阿字ヶ浦海岸における年超過確率 1/30 の汀線後退量は 25 m 程度と算定された。

最後に、本論文で扱った内容について、問題点を整理しておく。

栈橋のデータを極値資料として用いたが、実際には最も侵食された汀線位置が測定されたわけではない。したがって、ここで得られた後退量は過小評価である可能性がある。しかしながら、測定がなるべく高波浪来襲直後に実施されたことは述べておく。

直轄海岸の資料はデータ数が少なく、汀線後退量の頻度分布を阿字ヶ浦のそれと比較することはできなかった。標準偏差の比から確率点を推定する場合、厳密には頻度分布が類似していることを確認する必要がある。

参 考 文 献

- 合田良實 (1997): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 333 p.
 寶 馨 (1998): 現代水文統計論—水文頻度解析のモデル, 手法とその評価—, 1998 年度 (第 34 回) 水工学に関する夏期研修会講義集 A コース, 土木学会, pp. A-8-1-A-8-20.
 竹内邦良・星 浩・江藤剛治・寺川 陽・寶 馨 (1997): 水文リスク解析, 水文・水資源ハンドブック, 第 7 章, 水文・水資源学会 (編集), 朝倉書店, pp. 228-255.
 田中茂信・寶 馨 (1999): 毎年資料と非毎年資料による確率水文学の評価, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 145-150.
 山本幸次・福島雅紀・佐藤慎司 (1999): 阿字ヶ浦海岸における長期断面変化と砂厚, 海岸論文集, 第 46 巻, pp. 636-640.
 Stedinger, J. R., R. M. Vogel and Efí Foufoula-Georgiou (1993): Frequency analysis of extreme events, Chap 18., Handbook of Hydrology, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, NY, pp. 18.1-18.66.

4. おわりに

主要な結論は以下のようにとめられる。

深淺測量もしくは汀線測量が実施されてきた。また、航空写真は国土地理院によって、戦後 5 年に一度程度は撮影されている。これらのデータを整理し、汀線の時系列を作成した。データ数は多くても 40 個程度であり、上で用いた統計解析を適用することはできない。そこで、データ数が極端に少ない海岸のデータを除いて、以下の解析を行った。

最初に、各海岸の汀線位置の時系列に対して、最小二乗法によりトレンド成分を除去した。ここで、トレンド成分は直線近似で表現した。トレンド成分が除去された時系列の分散値を求め、阿字ヶ浦のそれと比較することで年超過確率 1/30 の汀線後退量を推定した。表-3 は、地域特性、底質特性および構造物の有無によりデータを整理し、その平均値をまとめたものである。斜線欄は、分類に属するデータがなかったことを意味する。粗砂で構成された海岸では細砂で構成された海岸に比べ汀線変動量が少ないこと、構造物のある海岸では構造物のない海岸に比べ汀線変動量が少ないことなどを確認できる。