

フィルター層を有する人工海浜の岸沖断面地形 の季節変動に関する研究

SEASONAL VARIATION OF BEACH PROFILE WITH A FIELTER LAYER

辻本剛三¹・山田文彦²・酒井大樹³・甲斐田秀樹⁴・柿木哲哉⁵

Gozo TSUJIMOTO, Fumihiko YAMADA, Daiki SAKAI, Hideki KAIDA, and Tetsuya Kakinoki

¹フェロー 工博 神戸市立高専教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

²正会員 博(工) 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

³学生会員 大阪市立大学大学院 都市系専攻 (558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

⁴学生会員 神戸大学市民工学科 (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町1-1)

⁵正会員 博(工) 神戸市立高専准教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

Measurements of onshore-offshore beach profiles and sand grain size at Maiko Beach, Kobe have been conducted at monthly intervals. The present beach has been constructed based on fail-safe concept using a gravel filter layer. The beach foreshore accretes from the spring to summer, while being eroded during the winter; the beach has been in the dynamic equilibrium state. Numerical simulated results show that depositional waves have been occurred in the summer and erosive waves in the winter. The beach profiles are shown using a quadratic profile with three time-varying parameters; quadratic convexity, mean slope and vertical displacement. The vertical displacement has high positive correlations with the quadratic convexity and the negative correlations with the mean slope.

Key Words : artificial beach, filter layer, average tide level, quadratic polynomia

1. はじめに

砂浜陥没事故を契機に人工海浜では、安全性を高めるためにフェイルセーフの考えに基づきフィルター層(F層)が設置されている。辻本ら^{1)・2)}は規則波や不規則波を用いてF層の設置位置や透水係数、潮位変化などを考慮して、岸沖断面形状の特性について詳細な実験やF層を考慮した波浪モデルの構築を行っている。F層の設置により海浜が侵食されることなく堆積傾向になり、図-1に示すようにF層を構成している砂礫の一部が表面に露出した場合を想定した実験でも、海浜地形に対する機能が低下することはないことを確認している。現地の露出した砂礫は、潮位や波浪の時間変化に伴い、前浜の底面に埋没、汀線近傍のステップ付近に堆積している。

現地では実験とは異なり、F層を構成している砂礫を含め、様々なスケールの底質で海浜が構成されており、また、1日1回～2回の干満が生じており実験では考慮が困難な風などの外力等が多数ある。長期的な安全性を検証するためには現地での継続的な調査は重要であるが、F層を有する人工海浜で調査は極めて少ないのが現状である。

本研究は、F層を有する人工海浜での約1年間における地形や底質特性の調査を行い、図-1に示すような状態における、人工海浜の岸沖断面地形の季節的

変動特性について議論することを目的とする。



図-1 表層に露出した砂礫

2. 現地調査

調査地点の海岸は図-2に示す神戸市アジュール舞子海岸である。当海岸は1998年にオープンした人工海岸であるが、2001年の近隣の大蔵海岸での陥没事故のために閉鎖され、2005年にフィルター層等の設置による安全対策を施して、再オープンした海浜である。最大2m/s程度の潮流が存在する明石海峡に

面しているが、離岸堤と防波護岸が複数設置された背後に当海岸が存在するため、比較的平穏な海域に面する海浜である。

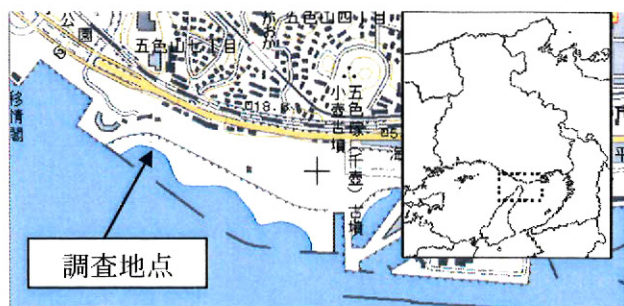


図-2 調査地点

(1) 調査方法

基準点より岸沖方向に側線を設け、2009年2月より月に1～2回の頻度で陸側の基準点より沖側に測線を10～16mの範囲で0.5m間隔の測点を設置した。測線長は潮位差が月毎により異なるために一定ではない。断面形状はレベル測量により地盤高さを計測し、1m間隔で表面及び鉛直方向の砂面のデジタルカメラ撮影し、粒径や淘汰係数は画像より算出した。5月には水圧式波高計による1昼夜の波高計測を実施した。潮位と風向風速は近隣の神戸港、明石の気象庁のデータを用いた。

(2) 断面形状

図-3に約1年間の断面地形の変化を示す。原点を0.4m毎下げて、隣接月の地形を比較して示す。4月頃より毎月底面が上昇し、8月頃にそのピークを迎えバームが水平距離5m辺りに形成される堆積型地形になり、9月頃までのその形状が保たれている。10月頃より徐々にバームが減衰し侵食傾向となり、12月～1月に侵食が生じ、計測を開始した2月の初期の地形に戻る動的平衡状態に近い形状である。

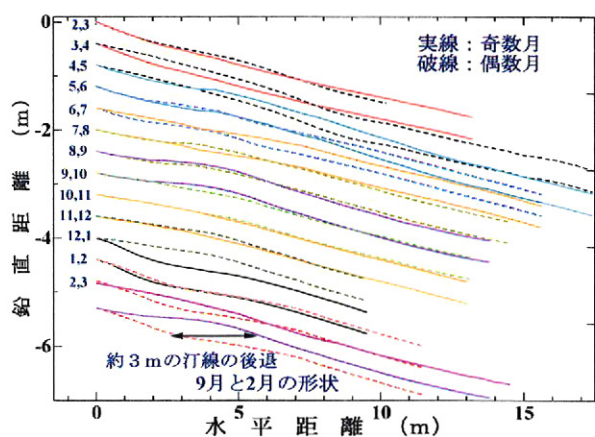


図-3 岸沖断面形状

(3) 底質特性

底質特性は各測点の表面を数mm程度の間隔で約30層にスライスした砂面をデジタルカメラで撮影し、

画像から各層における中央粒径と淘汰係数を算出した。その値を断面方向に積分することで平均値とした。画像から算定した値の妥当性についてはRubin³⁾、辻本ら⁴⁾によって確認されている。この様にして多量のデータを用いた。

図-4に水平方向4m付近と7m付近の中央粒径の鉛直分布をデータが煩雑にならない様に地形の堆積及び侵食した時期の結果を示す。底質粒径の変化が顕著になるように対数表示している。6月から7月にかけて7m付近の堆積部は粗粒成分であり、12月から1月にかけての侵食部は細粒成分と粗粒成分であり場所により構成している底質特性が異なる。

広域な特性を表示するために図-5に中央粒径の岸

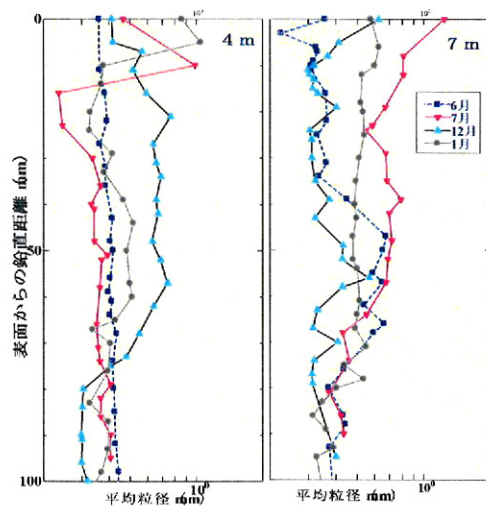


図-4 中央粒径の鉛直分布

沖分布を示す。図-3のバーム頂の陸側(2m付近)に第1ピークがあり、海側に向かって粒径が低下し、平均海面(7, 8m付近)で最小となり、汀線付近の最終砕波点で第2のピークとなり、Bascom⁵⁾が示した結果と同様になっている。

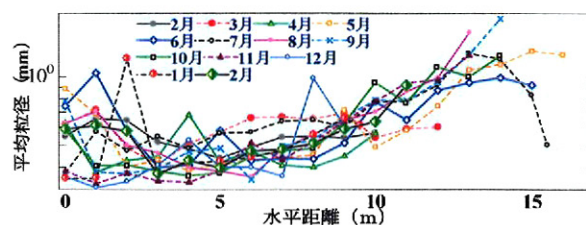


図-5 中央粒径の岸沖分布

季節的変動特性を示すために観測期間の平均値と各観測時との偏差の岸沖分布を示す。なお、図中の破線位置は(平均値-各観測値)の値が“0”を示しており、破線より上は底質が細粒化、下は粗粒化していることを意味する。なお、破線間隔は0.25mmである。堆積が生じる4月～6月にかけて、水平距離10m付近で細粒化し、季節の経過に伴い細粒化がより陸域で見られる。一方、9月頃より水平距離10m付近で粗粒化が見られ、侵食が生じた12月～1月はバームが形成されていた箇所の陸域で粗粒化が見られるものの、水平距離5m付近ではほぼ平均粒径

程度であり、粗粒化は生じていない。

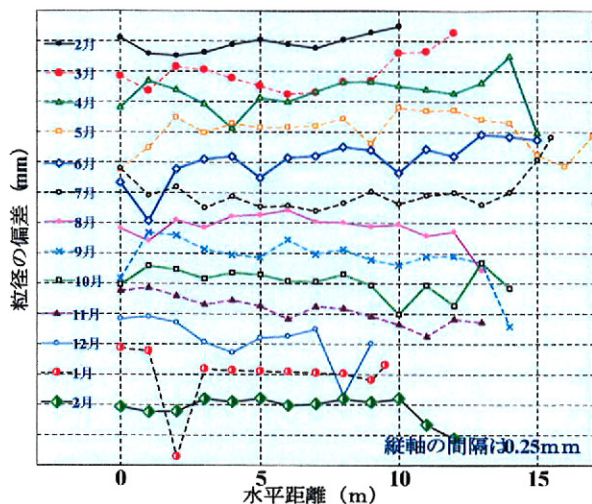


図-6 平均粒径との偏差の岸沖分布

粒度の分布の程度を示す淘汰係数の岸沖分布を図-7に示す。淘汰係数は粒径加積曲線の百分率が75, 25%に対応する d_{75} , d_{25} により式 (1) で定義され、その値が1.25程度で篩分けが良好と判断される。

$$S_o = \sqrt{d_{75}/d_{25}} \quad (1)$$

平均海面付近（水平距離8m付近）では季節変動小さく、篩分けが良好である。粒径の岸沖分布と同様に分布形に2つのピークがあり図-5の粒径が大きくなる箇所とほぼ同じ個所である。

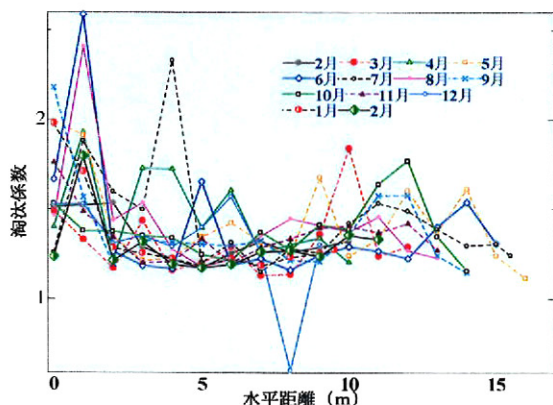


図-7 淘汰係数の岸沖分布

(4) 気象・海象の特性

図-3に示した地形変化に寄与する外的要因の1つである風向・風速との関連性について検討する。図-8に本調査地点より西側5kmに位置する明石の観測期間中の風向の頻度と風速を示す。風向は16方位で

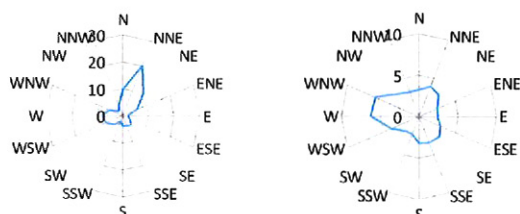


図-8 風向頻度 (%) と各風速 (m/s)

表し、その方向から風が吹いたという定義である。Nからの風が卓越しているが平均風速は5m/s以下である。当該海浜はSW方向に面し、その方向からの頻度も小さく風速も2m/s程度であり、さらに海岸構造物の背後に位置するため、年間を通じて比較的波浪は平穏であることが推測される。

5月9～10日に実施した1昼夜観測結果を図-9に示す。水深1.5mに設置した水圧式波高計による0.25秒毎にサンプリングされたデータを20分間隔で平均した波高と周期、その期間の風向、風速の時間変化である。この期間の風は南から平均風速1.7m/s、平均波高7.0cm、周期4.4秒の極めて平穏な波浪条件であった。図-3に示していないが両日の岸沖断面形状は変化をしていなかった。

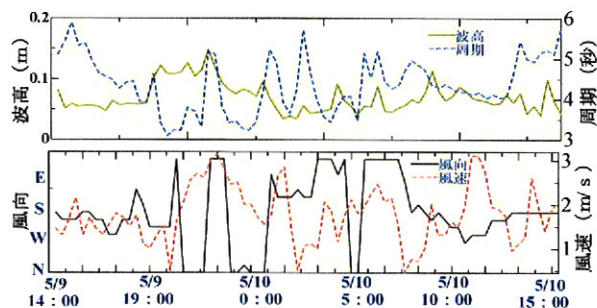


図-9 波高、周期、風速、風向の時系列

3. 短期的な岸沖断面地形変化

(1) 季節的变化と潮位

前述の風速・風向の結果より当該海浜の波浪は比較的平穏であることが予想され、動的平衡状態の海浜に寄与する外力として潮位の影響を検討する。

図-10に神戸港の観測基準面からの潮位を日平均とKZフィルターによる平均化した値を示す。海浜断面形状の変化と連動するように、春先から夏場過ぎまで平均潮位が上昇し、その後は冬場にかけて減少し、平均海面差は約±0.3m程度である。このような平均潮位の変化は柿木ら⁶⁾による白川河口においても観測されている。

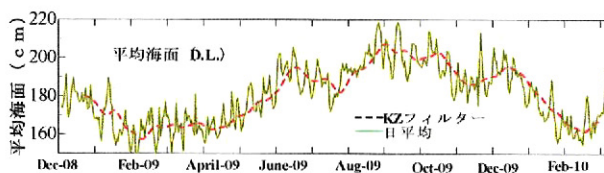


図-10 日平均とフィルター平均

Brunn⁷⁾ は平衡状態にある岸沖海浜断面に関して、平均海面の上昇高さ S_r と汀線の後退量 R との間に式(2)の関係があることを示している。

$$R = \frac{1}{\tan \theta} S_r \quad (2)$$

ここで、 $\tan \theta$; 岸沖方向の平均勾配である。平均勾配は沖側の移動限界水深付近を基準にし、多数の

現地海岸の結果から平均勾配は0.01～0.02程度であるとして $R=50S_p \sim 100S_p$ としている。本調査では干潮位までを対象にしており、平均勾配は0.1程度である。その結果、式(1)で算出される汀線の後退量は約3m程度であり、図-3の最下端に示した9月と2月断面形状の比較から、ほぼ同程度である。

(2) 月間的变化と波浪

図-3に示したように当該海浜は動的平衡状態であるが、12月～1月の急激な地形の変化は潮位等のみでは説明できないために、波浪特性の変化から検討した。波浪等のデータがないために風向・風速より推算した。

図-11に12月～1月の風向の頻度と風速を示す。図-8と比較して、この期間はWとNNEからの風の頻度が卓越している、前者の風速が平均的に8m/s程度であり、この方向の風の波浪による影響が考えられる。詳細にデータを調べると、風速10m/sが半日以上吹き続けた4～5日間存在していた。そこで、Wilsonの推算式を用いてW方向からの波、また、図-8からSSE方向の風も存在しているので両方向の波を推算した結果を表-1に示す。前者は10.4m/s、後者は7.4m/sの風速を用いた。

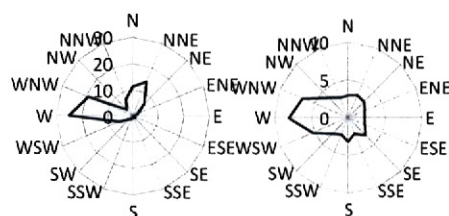


図-11 風向(%)・風速(m/s)

表-1 波浪推算の結果

	SSE	W
有義波高(m)	0.78	1.42
有義周期(sec)	3.46	4.57
吹送距離(km)	50	80
吹送時間(hr)	6	7.67

表-1の条件をブシネスク方程式(港湾空港技術研究所, Ver. 4.6β)に適用して波浪計算を行った結果を図-12に示す。SSE方向からの波浪は、防波堤の開口部を通過後は急激に減衰し、調査地点前面では0.25m以下に低下している。5月に計測した値との直接の比較は出来ないが、夏季に卓越する方向の波浪は比較的穏やかである。一方、W方向の波浪は防波堤の開口部を通過した後、大きな減衰は見られず調査地点前面でも0.5～1m程度の波高となっている。

(3) 無次元係数による分類

砂村らは式(3)のCパラメータで岸沖断面地形の分類を行い、現地では堆積型($C < 9$)、侵食型

($C > 18$)としている。

$$\frac{H_o}{L_o} = C(\tan \theta)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_o} \right)^{0.67} \quad (3)$$

ここで、 H_o : 沖波波高、 L_o : 沖波波長、 d : 底質粒径である。なお、沖波波高は表-1の値を与えるのではなく、調査地点前面水深1.5mの波高値から換算した。底質粒径は0.5mmとして式(2)よりSSE方向は $C=5.6$ 、W方向は $C=18.6$ の値を得た。SSE方向は堆積型、W方向は侵食型の波浪となり、このことよ

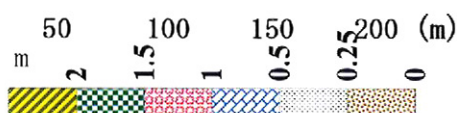
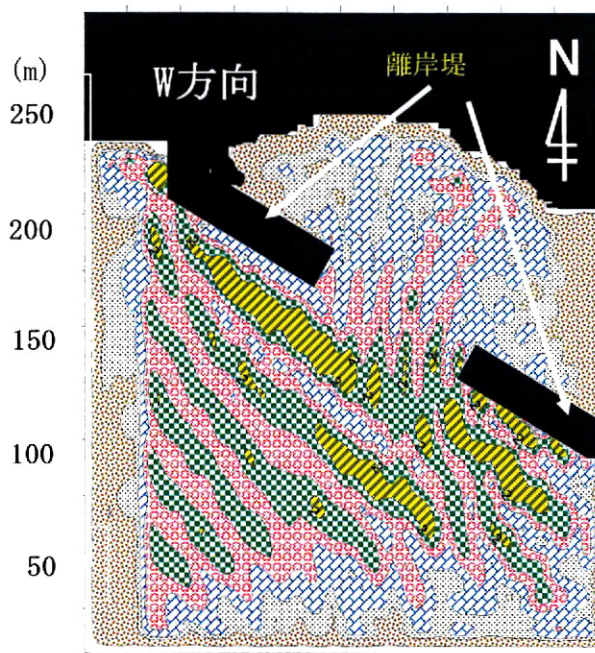
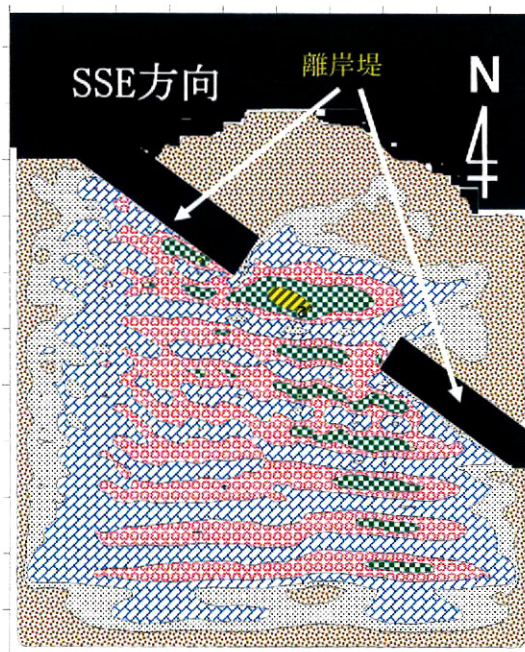


図-12 波浪の計算結果

り、12月～1月にかけての大幅な地形の変化は、この期間の侵食型波浪による影響であることが推測される。

4. 長期的な岸沖断面地形変化

(1) 2次元多項式近似

山田ら⁸⁾は地球温暖化に伴う長期的な海面上昇に伴う内湾の干潟地形の変形や消失の脅威に対して、干潟岸沖断面の変形特性を表す地形パラメータとして(1)断面曲率(2)地形の平均勾配(3)鉛直変位の3つの地形パラメータを用いて、干潟岸沖断面の時間変動の評価を試みている。干潟地形の勾配は1/950程度であり、本研究の海浜の勾配と2オーダー異なるが、ここでも同様に扱い、パラメータの導出等を簡単に述べる。

岸沖断面の2次元多項式は式(4)で表示される。

$$z(t, x) = -a(t)x^2 - b(t)x + c(t) \quad (4)$$

ここで、 z ：地盤高、 x ：基準点からの距離、 t ：時間、 a, b, c ：時間のみに依存するパラメータである。表-2に多項式近似式を観測断面に適用した結果を示す。表中の誤差は計測地盤高さと式(4)との偏差の絶対値の平均である。誤差が±2.6cm程度であり、式(4)の妥当性が人工海浜においても確認された。

表-2 多項式近似の適用結果

	$a \cdot 10^{-3} (1/m)$	$b \cdot 10^{-1}$	$c \cdot 10^{-2} (m)$	誤差 (cm)
最大値	7.3	1.68	8.11	4.8
最小値	-2.6	0.57	-7.51	1.05
平均	1.2	1.16	0.9	2.61

式(4)中のパラメータ b, c は基準点での局所的な地形勾配と鉛直変位の値になるために、データ解析範囲を代表するパラメータの導入が必要になり、式(4)に数学的考察を施すことで以下のパラメータを導出している。

$$Q = a \left(\frac{x_2 - x_1}{2} \right)^2 \quad (5)$$

$$S = a(x_1 + x_2) + b \quad (6)$$

$$D = -\frac{(a - a_m)}{3} (x_2^2 + x_1 x_2 + x_1^2) - \frac{(b - b_m)}{2} (x_1 + x_2) + (c - c_m) \quad (7)$$

ここで、 x_1, x_2 ：データ解析範囲の開始点と終了点、 a_m, b_m, c_m ：平均地番高さのパラメータである。式(5)が地形の凹凸度を表し、 $Q < 0$ ならば凹、 $Q > 0$ ならば凸な形状、 $Q = 0$ は直線である。式(6)は平均勾配を表し、式(7)は断面の堆積と侵食を表現する鉛直変位を表している。図-13に各パラメー

タ値と平均海面の時系列、表-3にパラメータの最大、最小、平均を示す。

春からの平均海面の上昇に伴い、地形は凹状から凸状の形状変化し、それに伴って鉛直変位も上昇し地形に底質が堆積していること示している。一方、勾配は多少平均海面の変化と位相差はあるものの徐々に緩勾配となり、夏場を過ぎる頃から徐々に勾配が急になり始めている。パラメータ間の相関係数は($Q-D: 0.8$)、($Q-S: -0.6$)、($S-D: -0.86$)となり、地形の凹凸度は鉛直変位と高い正の相関、地形の平均勾配とは高い負の相関、地形の平均勾配は

地形の凹凸度の負の相関が見られる。このように3つの地形パラメータを用いることで、データ解析範囲の断面の特徴が表現することが可能になる。これらの傾向は山田らの干潟地形の結果に類似している。

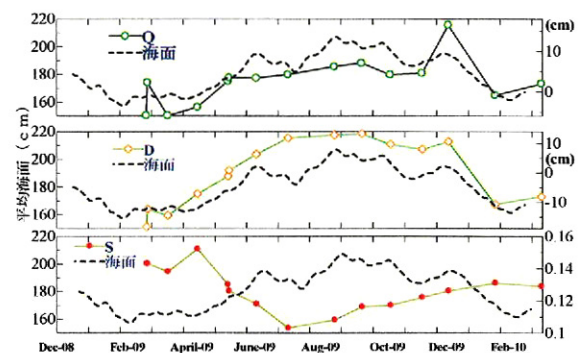


図-13 各パラメータの時系列

表-3 凹凸度・平均勾配・鉛直変位

	Q(cm)	$S \cdot 10^{-1}$	D(cm)
最大値	7.16	1.52	13.3
最小値	-5.87	1.03	-18.6
平均	2.76	1.27	0

(2) ワイブル分布による風速超過確率近似

潮位の変化の予測は数年先まではある精度のもとで長期予測が可能であり、当該海浜の岸沖断面形状の特性は潮位変化と連動しているの、長期的な視点からの岸沖断面形状の把握は可能である。しかしながら、限られた期間ではあるが冬期風浪の影響を無視することはできないために、風の評価する必要がある。実際には風速の継続時間やそれにより発生する波浪等の評価は、極めて難しい問題を含んでいるが、ここでは約1年間の調査期間中に侵食型の波が発生したと予想されるW方向からの風のデータをワイブル分布で整理した。結果を図-14に示す。

侵食型の波浪が発生する目安である風速10m/sの風の超過発生確率は10%程度であることが解る。

5. まとめ

2005年F層が設置されてから5年余り経過し、図-1

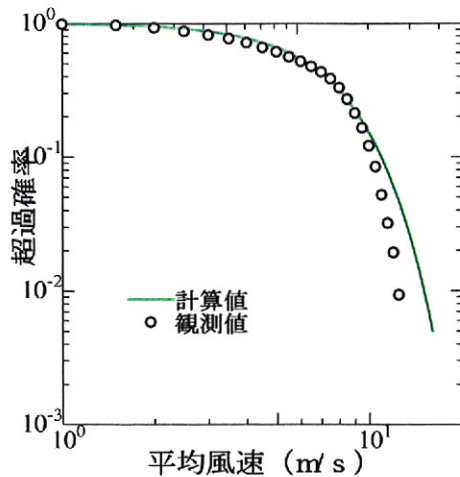


図-14 W方向の風のワイブル分布

に示したようにF層を構成していた砂礫が表面に多数露出している状態であり、初期の形状とは多少異なっており、このような状態下において海浜の安定性が継続されているのかを検討するため、2009年2月より人工海浜の前浜の地盤高さや底質特性を計測し、以下のような結論を得た。

①F層を有する人工海浜が動的平衡状態であり、堆積と侵食による汀線付近の変化量は、平均海面の上昇量に比例する。

②西寄りの風による波浪で堆積していた地形が侵食され初期地形に戻り、その風はワイブル分布で発生確率の算定が可能である。

③地形の凹凸度は冬季から春先にかけて凹度が強くなるが、その後は平均潮位の上昇に伴い凸度が顕著となり、秋頃にピークとなる。その後、凸度が減少し、平均潮位の変動に類似している。

④鉛直変位と平均勾配、凹凸度との相関が高い。

⑤F層を有する人工海浜においても、地形パラ

メータでその特性を評価することが可能である。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(C) (代表：辻本剛三、課題番号21560547) により行われました。また、波浪計算には「平山克也・平石哲也：修正ブシネスク方程式による高精度波浪変形の基本特性、港湾空港技術研究所資料、平成14年3月」を参考いたしました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 辻本剛三，細山田得三，大西剛史，柿木哲哉，宇野宏司：フィルター層を有する人工海浜断面の可逆性に着目した安全性に関する研究，海岸工学論文集，54，pp. 2007.
- 2) 辻本剛三，細山田得三，柿木哲哉，宇野宏司：不規則波によるフィルター層を有する海浜断面の可逆性から見た安全性について，海岸工学論文集，55，pp. 746-750，2008.
- 3) Rubin D. M.: A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment, J. Sedimentary Research, Vol.74, No.1, pp.160-165, 2004.
- 4) 辻本剛三，山田文彦，柿木哲哉：粒子画像を用いた底質粒径の計測方法の妥当性に関する研究，海洋開発論文集，第36巻，pp. 464-468，2008.
- 5) Bascom, W.H. : The relationship between sand size and beach face slope, Trans. Am. Geophys. Union, pp. 866-874, 1951.
- 6) 柿木哲哉，木下栄一郎，滝川清，山田文彦，外村隆臣，平均水面の季節変動が干潟地形に及ぼす影響，海岸工学論文集，50，pp. 471-475，2003.
- 7) Brunn, P.: The Brunn rule of erosion by sea-level rise: A discussion of large-scale two and three-dimensional usages, J. Coastal Research, 4, pp. 627-648, 1988.
- 8) 山田文彦，小林信久，柿木哲哉：地形パラメータを用いた干潟断面の季節的変動の要因分析，海岸工学論文集，50，pp. 551-555，2003.