

砂面計・鉄筋棒を用いた岩礁周辺での海底地形変動の現地観測

田中正博*・阿部光信**・宇多高明***

1. ま え が き

海岸線から沖向きに大きく突出した岬状の岩礁では、沿岸漂砂の移動は阻止され、沿岸漂砂に対しては閉境界をなす。しかし、多くの現地海岸では高波浪時の碎波帯幅と比較して、岩礁の沖向き長さが十分でなく、そのため岩礁が波浪条件に依存して閉境界となったり、あるいは開境界となる場合がある。特に露岩域がある場合には、そこが砂で覆われて移動床となる時期と、露岩が現れている時期とに分かれ、その周辺で複雑な砂移動が起こると考えられる。このような性質を持った岩礁が、ある一連の砂浜海岸に位置すると、その海岸での海浜変形の予測計算においては、境界条件の取り扱いが難しく、そのことが海浜変形予測の精度の低下を招く大きな要因となる。この種の問題は、相似性の点より実験的検討に限界があり、しかも現象は比較的波浪の静穏な条件（岩礁＝閉境界）だけでなく、高波浪時（岩礁＝開境界）にも密接に関係するから、とくに高波浪時も含む現地観測によってのみ明らかにしようと考えられる。このことから、本研究では、茨城県北部の天津漁港の南5 kmに位置する天然の岩礁状の岬である、天妃山周辺を観測海域として、現地観測によりこの問題について検討するものである。

2. 研究の動機と観測の概要

海底地形変動の観測は、茨城県北部に位置する天妃山（岩礁）において行った。図-1には観測区域周辺の海底地形（1993年6月測量）と観測点の配置を示す。天妃山は天然の岩礁であり、海岸線から約300 m沖向きに突き出ている。天妃山の南側には大きく北向きに蛇行してきた大北川がその付け根に流入している。沖合にも岩礁が広がるために、海底は複雑な等深線形状からなる。また天妃山の北側には5基の離岸堤が設置されている。図-1にはそれらのうち4基の位置を示すが、それらの設置水深は、約-3 mである。天妃山の南側隣接域の等深線の形

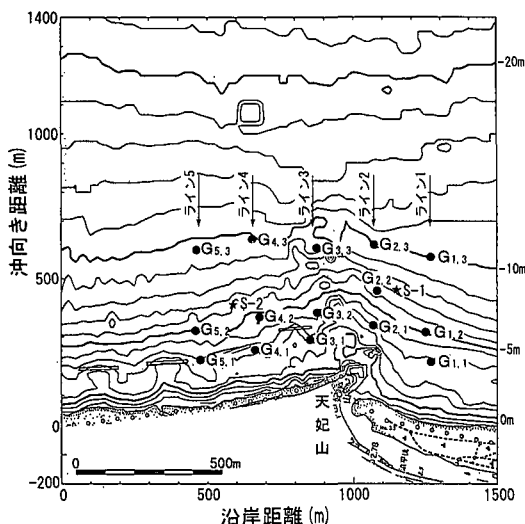


図-1 天妃山周辺における砂面計・鉄筋棒による観測の測点配置と深浅図（1993年6月測量）

状を調べると、汀線のすぐ沖にはバー・トラフが発達するが、-3～-9 mでは海底勾配が約1/40と急になる。さらに-9 m付近で海底勾配が大きく変化し、約1/150と非常に緩やかになる。-9 mまでの等深線が汀線とほぼ平行に緩やかに伸びていることから、この地点における波による地形変化の限界水深はほぼ-9 m付近にあると推定される。一方、天妃山の北側の、天妃山側から3基目より北側の離岸堤では海底の露岩は少なくなるが、ここでの沖合の等深線の形状は、離岸堤の開口部沖ではやや凹状に、そして離岸堤沖では凸状となっており、離岸堤と同位相等深線の変動が見られる。そして等深線の変動は、-6 mまで確実に生じている。一般に、沿岸漂砂が離岸堤群沖を通過する場合には、離岸堤群の沖合の等深線が沖向きに突出すること（宇多，1997）を考慮すれば、このような等深線の形状は、離岸堤沖を沿岸漂砂が移動している間接的証拠になると考えられる。このように、天妃山の南側ではほぼ-9 mまで、北側でも少なくとも-6 m付近まで活発な海浜地形変化が生じているのに対して、天妃山の岩礁はほぼ-5 mまでが不透過性の連続的岩礁であることから、天妃山では波浪条件によって

* 正会員 東京電力(株)建設部火力土木グループ
 ** 正会員 東電設計(株)第二土木本部火力土木部
 *** 正会員 工博 建設省土木研究所 河川部長

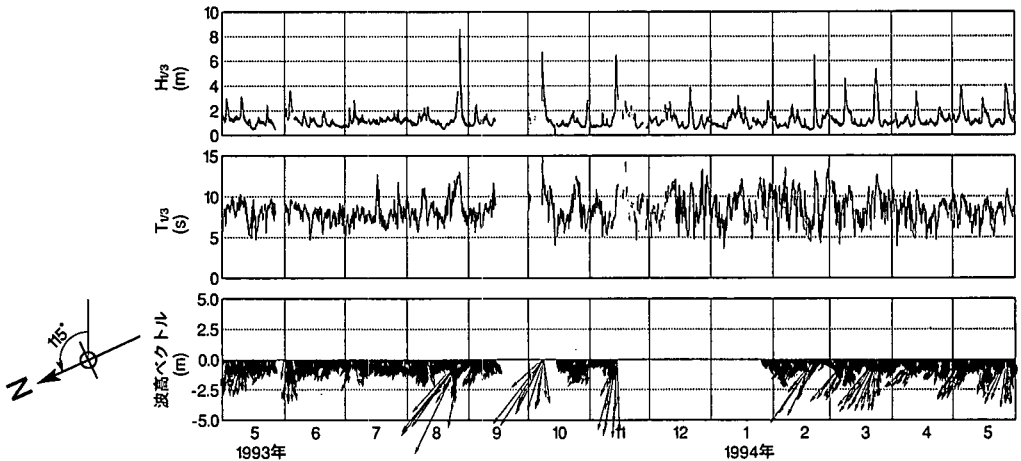


図-2 観測期間中の波高・周期・波向 (波高ベクトル)

沿岸漂砂が通過可能な条件にあると推定される。このことが本研究の着目点である。

観測は3種類からなる。第1は、天妃山の岩礁周辺の15地点において、鉄筋棒をダイバーにより海底面へ打ち込み、鉄筋棒に記した目盛りから海底地盤高の変化を求める観測である。第2には、砂面計により海底地盤高の変化を直接計測するものである。第3は、砂面計の設置地点の近傍において底質を採取し、これより底質の経時の変化を調べる観測である。鉄筋棒による観測では、天妃山の岩礁を中心として、沿岸方向に200m間隔で南側から北側へと5測線を配置し、それぞれの測線上において3点ずつ、合計15地点で海底地盤高の変化を測定した。測点は、ほぼ-10、-5、-3m付近に設置した。観測期間は1993年6月～1994年6月であり、毎月1回測定を行った。観測点は、No. 1～No. 5の各測線ごとに、岸側から1, 2, 3とし、 $G_{i,j}$ と表記する。ここに、 i は測線番号、 j は測点番号である。砂面計による観測では、図中S-1, S-2で示すように、天妃山の南北両側の-7m付近にそれぞれ砂面計を設置し、鉄筋棒の観測と同じ期間、2時間間隔で計測した。底質採取は、毎月1回の割合で行い、採取資料をJISA 102の方法により分析した。

また、観測期間中の波向を含む波浪条件を調べるために、天妃山沖の-20m地点に超音波式波高計と電磁流速計を設置し、これらから波高・周期・波向の時系列変化を測定した。図-2には、観測期間中の波浪条件を示す。途中、11月15日～1994年1月25日まで一部欠測期間があるが、8月末、10月初旬、11月中旬、に高波浪が来襲した。とくに8月26日には有義波高8.62m($T=12.1$ s)という高波浪であった。また1994年3月24日にも $H_{1/3}=4.98$ m($T=10.6$ s)の高波浪が来襲した。また11月を除く時期の高波浪はいずれも天妃山に対して時計回

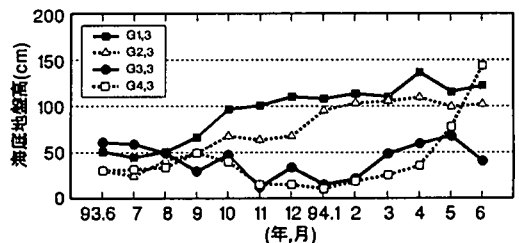
りの方向からの入射波が卓越していたことが分かる。

3. 鉄筋棒による海底地盤高変動の長期観測

天妃山周辺の15地点における、鉄筋棒による海底地盤変動の観測結果によれば、天妃山から北側に600m離れた測線No. 5では、特徴ある変動が見られなかったのを省略し、さらに結果の表示においては同一水深のデータをまとめて比較することが結果の理解につながることから、以下では同じ水深のデータごとに整理を行う。まず、図-3には、ほぼ-10m付近に位置する $G_{1,3}$, $G_{2,3}$, $G_{3,3}$, $G_{4,3}$ の観測結果を示す。これらの測点のうち、図-1の配置図によれば、天妃山の南側にあるのが $G_{1,2}$, $G_{2,3}$ である。 $G_{1,3}$ と $G_{2,3}$ とは互いによく似た変動を示し、観測期間中地盤高が増大傾向にあった。とくに、SSE方向から高波浪の来襲した1993年8月～10月の増加が著しい。初期値からの変動分に対する単相関分析によれば、図-4(a)に示すように両者の間には相関係数 $r=0.935$ で次式が成立する。

$$\Delta G_{2,3} = 0.934 \Delta G_{1,3} + 2.42 \quad \text{..... (1)}$$

すなわち、これら2地点では同種の地形変化が生じていることが分かる。これに対して、天妃山の北側に位置する $G_{3,3}$, $G_{4,3}$ では $G_{1,3}$, $G_{2,3}$ と逆傾向の変動が見られる。す

図-3 -10m付近の測点 $G_{1,3}$, $G_{2,3}$, $G_{3,3}$, $G_{4,3}$ における海底地盤高の変化

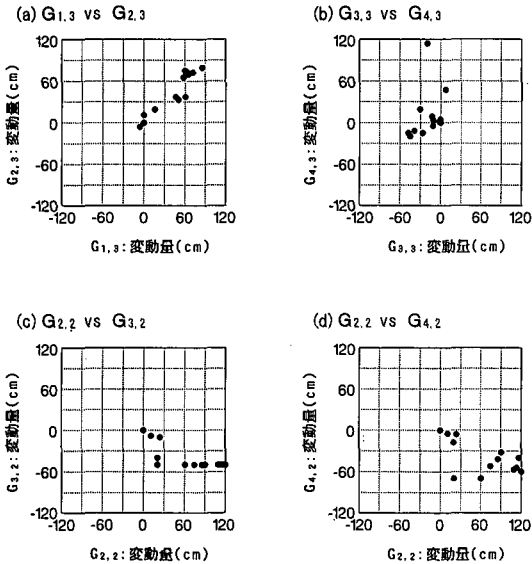


図-4 海底地盤高の変動量の相関図

なわち、1993年6月～1994年3月の間、海底地盤高が1993年11、12月頃を中心として低下し、その後再び増加傾向にある。そして $G_{3,3}$ と $G_{4,3}$ の間には図-4(b)に示すように正の相関が成立している。以上の4地点は、いずれもほぼ同じ水深であるにもかかわらず、海底地形変動パターンが相違する点は、岬状の岩礁を挟んで非対称的な地形変動であって、地形変化原因に沿岸漂砂が関与していることを強く示唆する。

図-5には、-7m付近に設置された各測点のうち、特徴的な変動の見られた $G_{2,2}$ 、 $G_{3,2}$ 、 $G_{4,2}$ における海底地盤高の変化を示す。これらの地点の変動では $G_{2,2}$ に最大の変化が見られ、1993年8月～9月に地盤高が約1mも増大したのち、1994年2月以降は緩やかな減少傾向を示す。これと対照的に、天妃山の北側に位置する $G_{2,2}$ 、 $G_{4,2}$ では、1993年8月に地盤高が減少して、-50 cm程度の値になった。これらは非常に対照的な変動である。この場合にも、初期値からの変動分に対して、 $G_{2,2}$ と $G_{3,2}$ 、 $G_{4,2}$ それぞれについて単相関を調べると、図-4(c)、(d)に示すように、それぞれ相関係数 $r = -0.784$ 、 -0.649 で

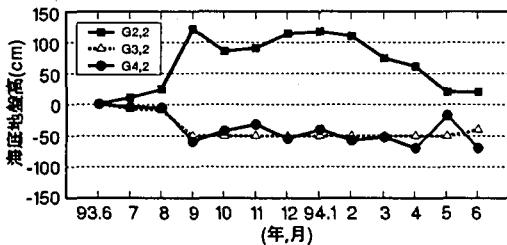


図-5 -7m付近の測点 $G_{2,2}$ 、 $G_{3,2}$ 、 $G_{4,2}$ における海底地盤高の変化

次式が成立する。

$$\Delta G_{3,2} = -0.317 \Delta G_{2,2} - 18.5 \quad \text{..... (2)}$$

$$\Delta G_{4,2} = -0.328 \Delta G_{2,2} - 17.7 \quad \text{..... (3)}$$

図-6には、-3m付近の測点の $G_{1,2}$ 、 $G_{2,1}$ の海底地盤高の変動を示す。 $G_{2,1}$ は天妃山の岩礁上の測点であり、観測当初は海底地盤が露出していたが、1993年8月の高波浪により一挙に海底面が砂で覆われた。この位置のすぐ北側に岩礁があって沿岸漂砂の移動はかなり阻止されていることから、この土砂は南側から沿岸漂砂によって運ばれてきたと考えられる。一方、 $G_{1,1}$ では高波浪の来襲によって海底地盤が低下し、その後はほぼ平衡状態を保っている。

以上の結果は図-7のように要約される。図には、有意な海底地盤変動の見られなかった地点を区別するとともに、有意な変動の見られた場所では、類似的变化と非対称的变化の見られた測点を示している。天妃山の岩礁が最も冲向きに突出しているのは、測線 No.2 と No.3 の間である。これによれば、大北川の河口沖に位置する $G_{1,1}$ を除いて、この境界を挟んで非対称モードの地形変化が卓越している。高波浪の来襲によって冲向きの土砂移動

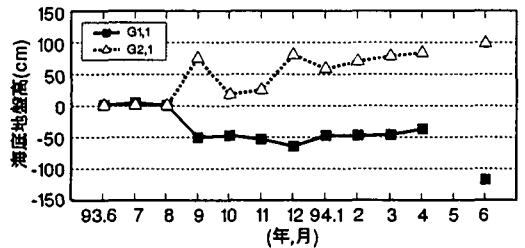


図-6 -3m付近の測点 $G_{1,1}$ 、 $G_{2,1}$ における海底地盤高の変化

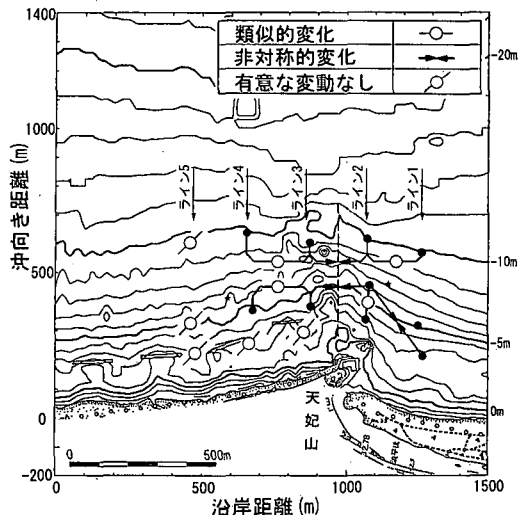


図-7 各測点における海底地盤高の変動パターン

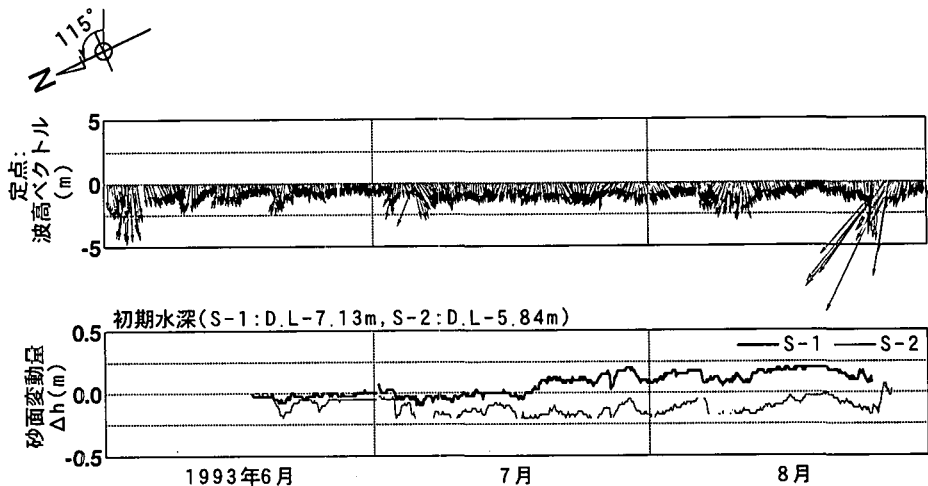


図-8 砂面計による海底地盤高の変化

が生じたのみでは、以上に述べたような、岬の岩礁を境に非対称的な変化は生じないから、上述の点は、沿岸漂砂によると結論される。

4. 砂面計による海底地形変動の直接観測

砂面計による観測結果の一例として、図-8には観測開始直後の1993年6月から8月の海底地盤高の観測結果を示す。図-1によれば、S-1の設置位置は、G_{2,2}に近い。そこで図-5をもとに6月～8月の海底地盤高の変化を調べると、2カ月間で約25 cm 海底地盤高が上昇している。この傾向は図-8にも現れている。S-1とS-2の海底変動には類似な動きが見られ、図-2と照らし合わせると波高が高くなると海底地盤が低下し、波浪が静穏になると地盤がもとに戻るという特徴が見られる。

5. 底質採取による海底底質の長期観測

表-1には、毎月1回の底質採取の結果をまとめ、図-9には中央粒径の経時変化を示す。S-1、S-2地点の比較では、平均値がS-1では0.35 mm、S-2では0.20 mmと同じ水深ではあるが、天妃山の南側のほうが粒径が大きい。また、S-1では、1993年9月には0.6 mmと、また1994年3月には0.42 mmと粗い粒径が現れている。この時期には1993年8月26日にはH_{1/3}=8.62 m (T=12.1 s)の高波浪が、そして1994年3月24日にはH_{1/3}=4.98 m (T=10.6 s)の高波浪が現れている。一方、この海岸での底質中央粒径の水深方向分布は図-10のように取られているので、これらと比較すると、この高波浪時には汀線近くの大きな粒径が-7 m 付近に現れたと推定される。

同じく図-11, 12には、底質粒度組成の経時変化を示す。中央粒径の変化と対応し、S-1では高波浪の来襲と

表-1 底質資料の分析結果

	S-1	泥分 (%)	粗砂分 (%)	細砂分 (%)	シルト、粘土分 (%)	中央粒径 (mm)	均等係数 U _c	曲率係数 U _c	比重
93. 6	0.0	0.0	31.0	60.5	8.5	0.30	3.98	1.26	2.70
93. 7	0.4	0.4	51.0	44.1	4.4	0.44	3.16	1.05	2.70
93. 8	0.1	0.1	20.2	74.5	5.2	0.28	2.56	1.10	2.72
93. 9	1.5	1.5	67.7	27.8	3.0	0.60	2.76	0.92	2.70
93. 10	2.7	2.7	49.8	43.2	4.3	0.45	2.89	0.98	2.70
93. 11	0.0	0.0	38.1	59.6	2.3	0.37	2.08	1.00	2.72
93. 12	0.0	0.0	21.2	74.5	4.3	0.33	2.09	1.19	2.71
94. 1	0.0	0.0	16.8	79.2	4.0	0.30	1.99	1.10	2.72
94. 2	0.0	0.0	18.7	77.0	4.3	0.31	1.90	1.08	2.70
94. 3	1.4	1.4	48.0	46.6	4.0	0.42	3.25	1.39	2.69
94. 4	0.3	0.3	12.8	81.8	5.1	0.27	2.36	1.15	2.72
94. 5	0.1	0.1	11.2	83.6	5.1	0.23	2.32	0.98	2.72
94. 6	0.9	0.9	24.7	68.6	5.8	0.30	2.71	1.12	2.72

	S-2	泥分 (%)	粗砂分 (%)	細砂分 (%)	シルト、粘土分 (%)	中央粒径 (mm)	均等係数 U _c	曲率係数 U _c	比重
93. 6	0.0	0.0	1.7	89.6	8.7	0.17	2.09	1.10	2.80
93. 7	0.1	0.1	3.9	90.8	5.2	0.22	2.14	0.98	2.79
93. 8	0.0	0.0	1.2	93.4	5.4	0.18	1.71	0.99	2.80
93. 9	0.0	0.0	12.3	84.4	3.3	0.29	1.99	1.09	2.72
93. 10	0.0	0.0	3.2	89.8	7.0	0.21	2.20	1.01	2.72
93. 11	0.0	0.0	4.2	91.6	4.2	0.21	2.03	0.97	2.80
93. 12	0.0	0.0	2.9	89.7	7.4	0.20	2.06	1.00	2.80
94. 1	0.1	0.1	2.7	91.7	5.5	0.18	1.89	0.99	2.80
94. 2	0.3	0.3	4.7	88.7	6.3	0.22	2.27	1.02	2.80
94. 3	0.0	0.0	1.2	91.8	7.0	0.17	2.04	1.04	2.85
94. 4	0.0	0.0	2.5	91.6	5.9	0.20	2.04	0.98	2.80
94. 5	0.1	0.1	7.3	88.8	3.8	0.18	1.79	0.96	2.80
94. 6	0.1	0.1	11.2	82.9	5.8	0.22	2.18	0.97	2.80

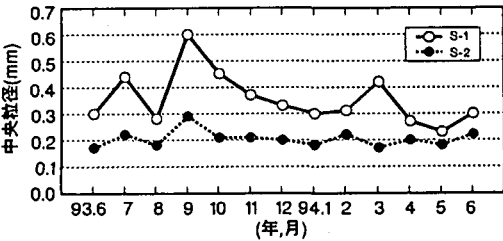


図-9 底質中央粒径の経時変化

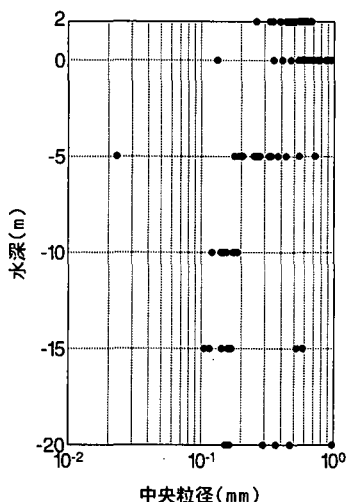


図-10 底質中央粒径の水深方向分布

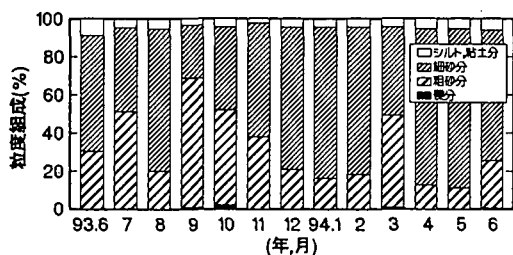


図-11 測点 S-1 における底質粒度組成の経時変化

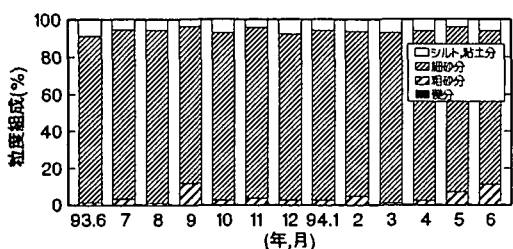


図-12 測点 S-2 における底質粒度組成の経時変化

対応して粗砂分の著しい増加が見られる。しかし、天妃山の北側に位置する S-2 では細砂分が常時卓越している。

6. 考 察

鉄筋棒による海底地盤変動の観測によれば、天妃山の岩礁を境にして、その南側と北側で非対称的な海底地形変動が生じていることが見い出された。天妃山は突堤状に突き出ているので、沿岸漂砂の阻止能力を有し、この

ためそれを挟んで対称的な地形変動が観察されたと考えられる。海底地形変動は天妃山の先端部の $G_{2.2}$ において最大の変位が見られた。しかもその変化が現れた時期には SSE と、周辺部の平均海岸線に立てた法線に対して 45° も斜め入射する条件で高波浪が来襲している。このことは、北向きの強い沿岸漂砂が生じ、天妃山に南側から乗り上げるようにして土砂が堆積したことを意味すると考えられる。この時、 -10 m 付近に設置された砂面計のうち、 $G_{1.3}$, $G_{2.3}$ では緩やかな堆積傾向、天妃山の北側に位置する $G_{3.3}$ では減少傾向にあった。しかも汀線から突堤状に伸びている岩礁の先端水深はほぼ -5 m と浅いことから、天妃山の岩礁の沖合でも一部の土砂移動は起きており、北向きの沿岸漂砂移動は岩礁による部分的に阻止されつつ、一部が北側へと回り込んだと推定される。結局、この岩礁の沿岸漂砂阻止能力は波浪条件に依存し、沿岸漂砂移動が約 -5 m までで生じるときは閉境界となるが、波高が高く沿岸漂砂移動が -5 m 以深まで生じる場合には、部分的な沿岸漂砂阻止効果を有するに止まると判断される。

7. 結 論

天妃山沖での海底地盤変動の現地観測の結果は以下に要約される。

① 岩礁周辺部での鉄筋棒による海底地盤変動調査では、台風に伴う $H_{1/3}=8.6$ m という高波浪時をも含む時期の観測に成功した。これにより、南側からの入射波条件で高波浪が作用したために、 -10 m 以浅の区域において、岩礁を挟んで南側で堆積、北側では侵食というモードの地形変動が観測された。これより、この岩礁は通常時には沿岸漂砂を阻止するが、高波浪時には岩礁の沖を砂の一部が通過しうることが分かった。

② 毎月 1 回行われた 1 年間に亘る底質調査によれば、上述の高波浪時、岩礁南側の堆積空間に含まれる -7 m 地点では、通常時の $d_{50}=0.3$ mm から 0.6 mm と粗な粒径となり、その後侵食されると再び 0.3 mm 程度の粒径になるという、質的变化を遂げていることが見いだされた。この海岸の d_{50} は、汀線では約 0.95 mm 以下と粗であるが、水深方向に減少し、 -10 m では約 0.15 mm と細粒になることを考慮すると、以上の粒径の経時的変化は、高波浪時には汀線近傍の粗な粒径が -7 m 付近まで攪乱を受けて移動していることを意味すると考えられる。

参 考 文 献

宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, (株)山海堂, p. 460.