

後浜変形過程に及ぼす波の影響

有働恵子¹・栗山善昭²

茨城県波崎海岸における 1988～1997 年の後浜地形、波浪、ならびに風況の長期データを用いて後浜の長期変形と波の遡上高および飛砂量との関係を調べ、後浜変形過程に及ぼす波の影響を評価した。砂浜断面の時系列より得られる等高線の岸沖方向位置の経時変化特性と、その地盤高への波の遡上率とを比較したところ、遡上率が 0.1% 以上の地点においては地形変化への波の影響が無視できないと判断された。波の遡上率は砂浜変形の要因を判断する指標として有用であった。高波浪時の後浜における堆砂高と波の遡上高との間には線形の相関関係が認められ、漂砂は後浜の海側への拡大の一大要因であった。

1. 緒 言

砂浜は豊かな生態系を育む貴重な空間であるとともに、後背地を災害から護る重要な空間である。砂浜地形は、波の作用を受ける領域では漂砂によって、波の作用を受けない領域では飛砂によって変形する。砂浜は主に漂砂により変形することから、これまでの砂浜変形に関する研究の多くは、波の作用頻度の高い領域（前浜）を対象としてきた。しかしながら、今後予測されている海水位上昇や台風の巨大化の影響を考えれば、波の作用頻度が低くても高波浪時に波の影響を受ける領域（後浜）の地形変化に関する知見を蓄積する必要がある。

後浜変形については飛砂のみの影響を考慮した研究が多い（例えば、有働・武若, 2001）。波の遡上域においては、バームの変形過程や底質粒径特性に関する研究が報告されている（宇多ら, 1989；加藤・柳嶋, 1992）。有働ら（2005）は特に荒天時の後浜地形変化および底質粒径変化に注目し、荒天時の波による後浜の堆砂と砂の粗粒化の発生例を示している。

波の遡上域におけるバームの変形や後浜の短期的な変形への漂砂の影響については報告されているものの、後浜の長期的な変形への漂砂の影響については不明である。本研究では、砂浜長期変形と波浪および風況との関係を調べ、後浜変形過程に及ぼす波の影響を解明する。

2. 現地観測の概要

現地観測は、鹿島灘に面する茨城県神栖市波崎海岸（波崎海洋研究施設、HORS）で行った（図-1）。HORS 基準面を地盤高基準とした観測地の地形を図-2 に示す。図-2(a) は台風 8818 号（9 月 17 日）が、(b) は台風 9720 号（9 月 19 日）が鹿島沖を通過した後の地形で、ほぼ

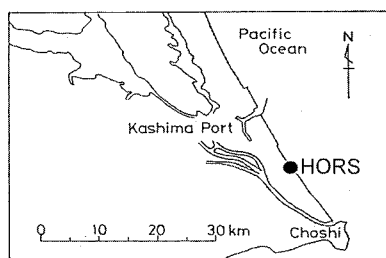


図-1 観測地の位置

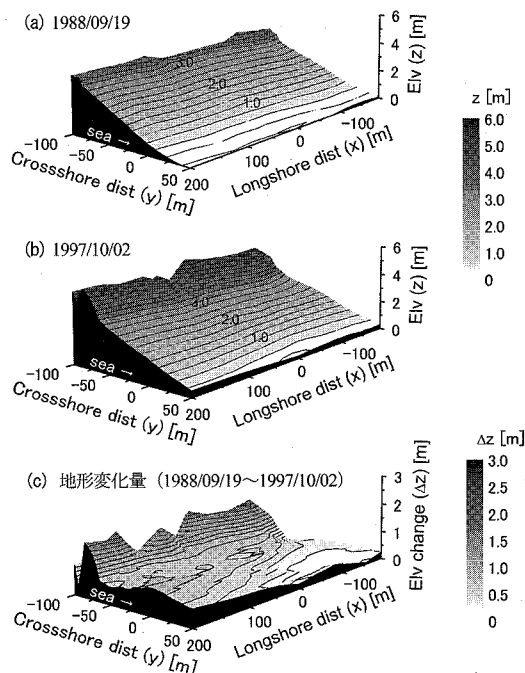


図-2 観測地の地形（地盤高基準：DL=TP-0.687 m）

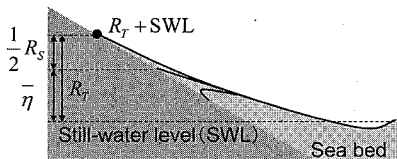
一樣勾配となっている。波崎海岸は砂浜幅 120 m 程度、砂浜勾配 0.02～0.04 の逸散型海岸（dissipative beach）であり、(c) より特に $y = -80$ m および -40 m 付近における堆砂が顕著な堆積海岸である。前浜から後浜にか

1 正会員 博(工) 東北大学助手 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

2 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 漂砂研究室長

表-1 現地計測データ一覧

	計測項目	計測（データ記録）頻度	計測地点	計測期間
Data1	砂浜断面地形	1day	$y = -115 \sim 25 \text{ m}$	1988～1997 年（10 年間）
Data2	平均水位	1hr (1/0.3 Hz, 20 min データを処理)	$y = 378 \text{ m}$ (水深 6 m)	
Data3	有義波高・長周期波高			
Data4	平均風向風速	1hr (1Hz, 10 min データを処理)		
Data5	波の遡上位置	不定期（全 44 回, Data1 と同時刻）		1997～1998 年（1 年間）

図-3 波の遡上位 ($R_T + SWL$), 遡上高 (R_T), swash (R_S), set-up (η), ならびに平均水位 (SWL) の関係

けての底質粒径は $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 程度である。HORS では、観測栈橋測線 ($x=0 \text{ m}$, $y=-115 \sim 385 \text{ m}$) 上の断面地形を 5 m 間隔で 1986 年以降約 20 年間ほぼ毎日計測している。

砂浜の陸側には保安林が植栽され、砂浜と保安林の境界付近には 1990 年前後に設置された複数列の堆砂垣により砂丘が形成されている。1985～1986 年頃は砂丘周辺には海岸植生が密に繁茂しているものの、砂浜にはほとんど繁茂していなかった。1990 年頃には砂浜にも植生がパッチ状に繁茂していた。

観測地より約 10 km 北側に位置する鹿島港検潮所（水深 24 m ）で取得された 1971～2000 年の 30 年間の潮位データによれば、平均潮位、平均干潮位、ならびに満潮位は、それぞれ $z=0.64 \text{ m}$, -0.29 m , ならびに 1.31 m である。海水位は約 6 mm/year の割合で上昇していた。観測栈橋先端（水深 6 m ）における潮位は鹿島港の潮位と概ね等しい。観測地の卓越風向は北～北東で通年海風が卓越するが、2～8 月には陸風も卓越する（有働ら, 2005）。

観測データの概要を表-1 にまとめる。Data2 および Data3 は観測栈橋先端に設置された超音波式波高計を用いて、Data4 は $z=10 \text{ m}$ の高さに設置されたプロベラ式風向風速計を用いて計測した。Data3 は、周波数スペクトルを用い、波高分布にレイリー分布を仮定して算定した。長周期成分は $f \leq 0.033 \text{ Hz}$ とした。Data5 は、目視により平均的な遡上位置を観測した。

解析では、1997～1998 年の Data1～Data3 および Data5 を用いて波の遡上高と長周期波高の関係を調べる。得られた関係と 1988～1997 年の Data2 および Data3 を用いて波の遡上位を、Data4 を用いて飛砂量を推定し、これらと砂浜の長期変形 (Data1) との関係を調べる。本来ならば、波の地形変化への影響の指標としては遡上

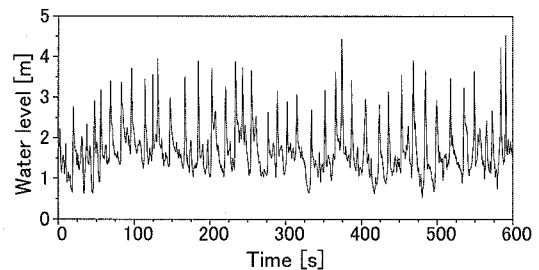


図-4 水深 6m 地点における荒天時の水位変動データ例 (台風 9720 号, 1997 年 9 月 18 日 5:00:00～5:10:00)

位ではなく漂砂量を使用すべきところであるが、現段階における漂砂量の推定精度では本解析に不十分であるため、ここでは波の遡上位を使用した。

3. 観測データの解析方法

(1) 波の遡上位の推定

波の遡上位 ($R_T + SWL$), 遡上高 (R_T), swash (R_S), set-up (η), ならびに平均水位 (SWL) の関係を図-3 に、波崎海岸の水深 6 m 地点における荒天時の水位変動データ例を図-4 に示す。Guza・Thornton (1981, 1982) は、砂浜勾配 $0.03 \sim 0.05$ の Torrey Pines 海岸 (米国カリフォルニア州) において現地観測を行い、 R_S および η と水深 10 m 地点における有義波高 $H_{1/3}$ との間に次の関係を得た。

$$R_S = 0.7 H_{1/3} \dots \dots \dots (1)$$

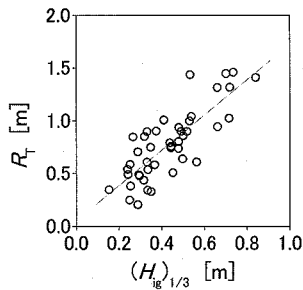
$$\eta = 0.17 H_{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

よって、 R_T は $H_{1/3}$ と、

$$R_T = \frac{1}{2} R_S + \eta = 0.52 H_{1/3} \dots \dots \dots (3)$$

の関係にあると考えられる。波崎海岸においてこれらの関係を調べたものの、明確な相関関係は得られなかった (相関係数 $r=0.52$)。Guza・Thornton は長周期成分の重要性を指摘していることから、 R_T と長周期波高 (H_{lg}) $_{1/3}$ との関係を調べ、(H_{lg}) $_{1/3}$ より算定される R_T に SWL を加えることにより、 $R_T + SWL$ を推定することとした。

波の実測遡上位から、同時刻に計測された SWL (Data2) を差し引いたものを R_T と定義し、これと (H_{lg}) $_{1/3}$ (Data3) との関係を調べた。実測遡上位は、Data5 および同時刻に計測した Data1 より求めた。 R_T

図-5 波の遡上高 R_T と長周期波高 $(H_{ig})^{1/3}$ の関係

と $(H_{ig})^{1/3}$ の関係を図-5に示す。これらの間には、

$$R_T = 1.67(H_{ig})^{1/3} + 0.05 \quad (4)$$

の高い線形の相関関係 ($r=0.81$) が得られた。 $(H_{ig})^{1/3}$ (Data3) を用いて式(4)より得られる R_T と Data2 との和より、1時間毎の波の遡上位 $R_T + SWL$ を推定した。

(2) 飛砂量の推定

飛砂量 q_{wind} は、対数分布則 (式(5)), Bagnold の限界摩擦速度 u_{*t} の式 (1941, 式(6)), ならびに Owen の飛砂モデル (1964, 式(7)) を用いて推定した。

$$u_* = \kappa u_{378} / \log(z_A / z_0) \quad (5)$$

$$u_{*t} = A \sqrt{g d (\rho_s - \rho) / \rho} \quad (6)$$

$$q_{wind} = \frac{\zeta \rho}{g} u_* (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (7)$$

ここで、 u_* : 摩擦速度、 κ : カルマン係数 ($=0.41$), u_{378} : $y=378$ m における風速、 z_A : 風向風速計設置高—後浜地盤高 ($=7$ m), z_0 : 地表面粗度高 ($=d/30$ m), A : 無次元係数 ($=0.1$), g : 重力加速度 ($=9.81$ m/s²), d : 砂の粒径 ($=0.2 \times 10^{-3}$ m), ρ : 空気密度 ($=1.226$ kg/m³), ρ_s : 砂の密度 ($=2.65 \times 10^3$ kg/m³), ζ : 係数 ($=1.5$) である。

1時間毎の風速データ u_{378} (Data4) を用いて式(5)より u_* を求め、これが式(6)より得られる u_{*t} を超える場合に式(7)より q_{wind} を推定した。得られた値は1時間分の飛砂量に換算し、風向データを用いて岸沖方向の陸向および海向飛砂量を計算した。降雨時には飛砂の発生が抑制されるが、目視観測によれば強風時には含水比の大きい地表面の砂が剥ぎ取られ、乾燥した飛砂が発生する。よって、ここでは含水比の影響を考慮しないこととした。

4. 後浜長期変形への波および風の影響

(1) 砂浜長期変形の概要

砂浜断面地形、波の日最大遡上位 ($R_T + SWL$)_{max}, ならびに海向および陸向の日飛砂量 Q_{wind} の時系列を図-6に示す。断面地形の計測は概ね午前8時頃行うことから、午前8時から24時間を日単位として (R_T

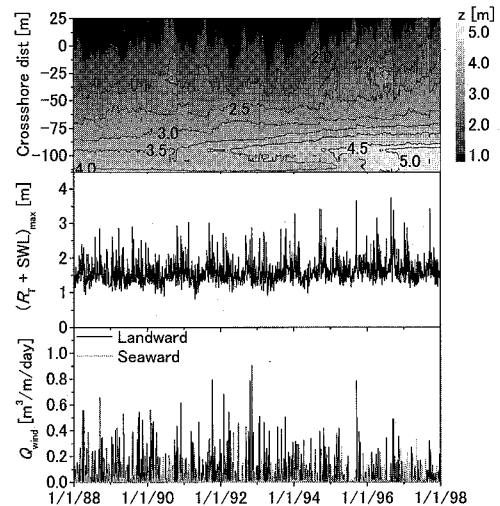
図-6 砂浜断面地形、波の日最大遡上位 $(R_T + SWL)_{max}$, ならびに陸向および海向の日飛砂量 Q_{wind} の時系列

表-2 3.38 m 等高線位置の海側変化時の波浪および飛砂状況

	Δy	$(R_T + SWL)_{max}$	$\Sigma Q_{wind} (L, S)$
90/11/30-12/04	2.1	2.64	(0.31, 0.17)*
91/02/15-02/16	2.8	2.51	(0.10, 0.06)*
94/09/16-09/19	1.4	3.41	(0.14, 0.00)
95/09/16-09/20	3.8	3.65	(1.60, 0.01)*

Δy : 等高線位置の岸沖方向変化量[m]

(L, S): 飛砂量の陸向および海向成分[m³/m], *: 降雨有

+ SWL)_{max} および Q_{wind} を算定した。

断面地形の時系列より得られる等高線 (図-6 上図の黒線) の位置、すなわち、地盤高 z の岸沖方向位置の経時変化より、波崎海岸は長期的には堆砂傾向にあった。等高線位置のトレンドおよび変動は、堆砂垣が設置された1990年前後で異なった。1988~1990年においては、等高線位置のトレンドおよび変動のいずれも海側で大きく、砂丘付近 ($z \geq 3.25$ m) のトレンドは $-0.8 \sim 0.5$ m/year で小さかった。1990年以降は砂丘付近の等高線位置の海側への前進が顕著になり、 $y = -100$ m 付近で砂丘が発達した。

波の遡上頻度の低い、砂丘海側に位置する $z = 3.38$ m 等高線が海側へ不可逆的かつ顕著に変化する時の、観測日間における $(R_T + SWL)_{max}$ および ΣQ_{wind} を表-2にまとめる。ここでは数日間海側へ1m以上変化するときのデータを抽出した。大幅に等高線位置が変化する場合 $(R_T + SWL)_{max}$ が比較的大きいものの、 ΣQ_{wind} との間に明確な関係は得られなかった。このとき、図-7に例示する高波浪によるバーム侵食およびそれより高いレベルにおける堆砂の同時発生 (加藤・柳嶋, 1992) が観測された。 $z = 3.25$ m および 3.50 m 等高線の不可逆的变化についても同様の結果が得られた。

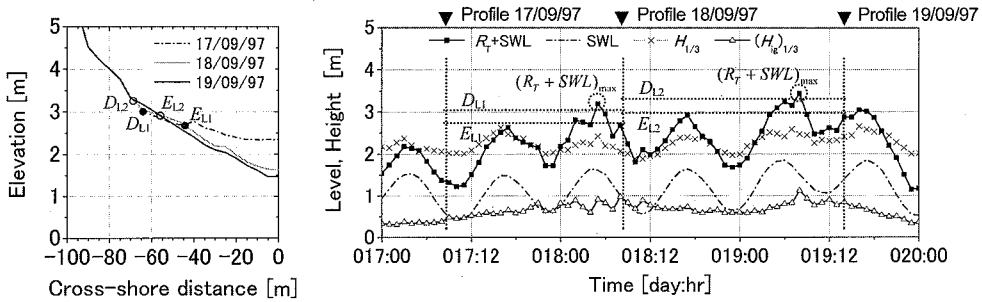


図-7 砂浜断面変形と波浪状況の例 (図-3 および図-4 参照, D_{L1} , E_{L1} : 4. (3) 参照) $R_T + SWL$: 波の遡上位, SWL : 平均水位, $H_{1/3}$: 有義波高, $(H_{1/3})_{max}$: 長周期波高

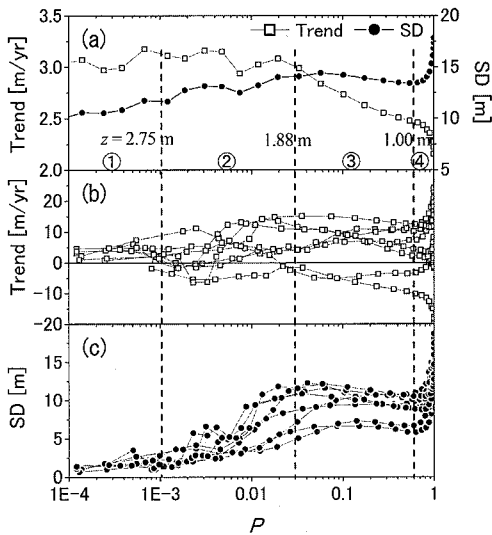


図-8 1988~1997年の(a)10年間および(b)(c)1年毎の期間における波の遡上率 P と砂浜断面地形の等高線位置のトレンドおよび変動との関係 (①~④: 4.(2)参照)

(2) 砂浜変形と波の遡上の関係

断面地形の $z=0.00\sim3.50$ m 等高線位置のトレンドおよび変動(標準偏差, SD)と地盤高 z 地点への波の遡上率 $P(z)$ との関係より, 波および風の地形変化への影響を調べた。 $P(z)$ は, 対象期間 T_0 のうち, 式(4)により推定した遡上位が $R_T+SWL>z$ を満たす時間の割合 ($=T(R_T+SWL>z)/T_0$) で表される。 1988~1997 年の(a)10年間および(b)(c)1年毎の期間の結果を図-8に示す。

等高線位置の変化特性は, 概ね $P\leq 0.001$ (①, 砂丘付近), $0.001\leq P\leq 0.03$ (②, 後浜付近), $0.03\leq P\leq 0.6$ (③, 前浜陸側付近), ならびに $P\geq 0.6$ (④, 前浜海側付近) で異なった。 $P(z)$ は各期間の波浪状況によって異なり, 10年間のデータについては $P(1.00)=0.66$, $P(1.88)=0.033$, ならびに $P(2.75)=0.0012$ であった。 SD は $P=0.6\sim 0.7$ ($z=0.88\sim 1.13$ m) で極小となり, このときの z は10年間の平均水位 ($z=0.80$ m) と概ね等しくなった。

等高線位置の10年間の長期変化特性について述べる。トレンドについては, $P\leq 0.03$ のときほぼ一定の値となり, $P\geq 0.03$ のとき P と負の相関関係にあった。変動については, $P\leq 0.03$ のとき P と正の相関関係にあるものの, $0.03\leq P\leq 0.6$ のときほぼ一定の値となり, $P\geq 0.6$ のとき再び P と正の相関関係にあった。

等高線位置の1年毎の短期変化特性について述べる。1990年および1996年については $y=-40\sim -30$ m 付近のバームの発達 (図-6 および図-7 参照) により適切なトレンドおよび変動データ取得が不可能であったため, これら2個を除く8個のデータセットを用いた。トレンドについては, $P\leq 0.001$ のときは絶対値が小さいのに対し, $P\geq 0.001$ で徐々に大きくなった。トレンドが年によって大きく異なる原因は, 波浪条件および沿岸漂砂特性の変化にあると考えられる。④の領域におけるトレンドは, 1988年, 1994年, ならびに1996年は小さく, 1993年は侵食傾向で, それ以外の期間は堆積傾向であった。変動については長期特性と同様の結果が得られた。

等高線位置の変化特性を①~④の領域別に述べる。①においては, 短期トレンドおよび短期・長期変動はいずれも小さく, 主に飛砂の影響を受けて地形が変化した。堆砂垣の飛砂抑制効果により, 堆積作用と比べて侵食作用を受けることは少ないため, 長期トレンドは比較的大きかった。

②においては, P が大きくなるにつれて短期トレンドの絶対値および短期・長期変動が大きくなり, 漂砂の影響が徐々に大きくなった。長期トレンドは①と同様に比較的大きかった。

③においては, 短期トレンドの絶対値が②と比べて大きくなる場合もあったものの, P が大きくなるにつれて長期トレンドおよび短期・長期変動はいずれもやや小さくなった。これは, 地盤高が10年間の平均水位に近づくことにより②に比して地形が平衡断面となる頻度が高くなり, 波の作用頻度は高くなるものの漂砂による地形変化は小さくなったためと考えられる。

④においては, 波の作用頻度がさらに高くなり短期ト

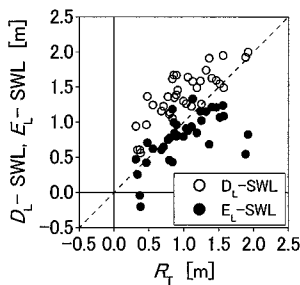


図-9 最大・最小堆砂高 D_L-SWL , E_L-SWL と波の遡上高 R_T の関係

レンドの絶対値および短期・長期変動が大きくなるものの、長期トレンドは①～③より小さくなった。これは、堆積と侵食の両方を受けて地形変化の傾向が緩和されたためと考えられる。

波の作用頻度が低い領域では、これまで長期変形への波の影響を考慮することが少なかった。砂丘海側の等高線位置の大幅な海側への変化が高波浪時に生じること(表-2参照)や、②においてSDがPの増加に伴い大きくなることを考慮すると、波崎海岸では $P \geq 0.001$ の地点において波の影響を無視できないと判断される。

(3) 後浜における堆砂現象と波の遡上高の関係

後浜の海側への拡大の要因は、後浜から砂丘にかけての等高線の大幅な海側変化が高波浪時に生じていることから、高波浪時の堆砂現象(図-7)にあると考えられる。堆砂現象と波浪の関係を調べるため、 D_L および E_L を高波浪時の堆砂領域の最大および最小レベルとし、最大・最小堆砂高 D_L-SWL および E_L-SWL と、その計測日間における R_T+SWL が最大となるときの R_T とを比較した。1990年および1996年に見られたバーム発達の影響を除外するため、堆砂発生前の $y = -60 \sim -30$ m および $y = -30 \sim 0$ m の地形勾配がいずれも 0.02 以上で、堆砂および侵食領域の断面積変化が 1 m^2 以上であるデータを抽出した。

D_L-SWL および E_L-SWL と R_T との関係を図-9に示す。これらの間にはそれぞれ線形の相関関係が認められたものの、 D_L-SWL は R_T よりやや大きい値となったのに対し、 E_L-SWL は R_T とほぼ等しいか、もしくは小さい値となった。ここでは堆砂高と目視観測により得られた平均的な遡上高とを比較しているが、この堆砂現象を説明するには、より大きい遡上高、例えば瞬間最大遡上高をも考慮する必要がある。データのばらつきの原因としては、 $(H_{1/3})^{1/3}$ を求める際、波高分布にレイリー分布を仮定したこと等が考えられる。

本研究では、顕著な地形変化が発生する場合について、その変化と波の遡上位および遡上高との比較を行うことにより波の影響を議論したが、逆に、波の遡上位および

遡上高が大きいとき必ずしも顕著な地形変化が生じるとは限らない。これは高波浪が作用する直前までの地形変化、すなわち直前までの地形の履歴によって、漂砂量が異なるためと考えられる。

(4) 波崎海岸における後浜変形過程

後浜から砂丘にかけての等高線位置(概ね $z \geq 1.88$ m)の変化および堆砂垣の設置時期を考慮すると、波崎海岸における後浜の長期変形過程は以下のように推察される。

観測期間を通して、後浜は主に高波浪時の漂砂により海側へ拡大した。これに加えて1990年以降は、堆砂垣の設置による捕砂、および、後浜の拡大に伴う飛砂の増大により砂丘が発達し、砂丘域が海側へ拡大した。後浜は、漂砂による後浜の海側への拡大および飛砂による砂丘の発達により、複合的に変形した。

5. 結 論

波崎海岸における後浜の長期変形と波の遡上高および飛砂量との関係を調べることににより、後浜変形過程に及ぼす波の影響を調べた。波崎海岸における砂浜断面地形の等高線位置の変化特性は、波の遡上率によって異なっており、遡上率が0.1%以上の地点においては後浜長期変形への波の影響が無視できないと判断された。波の遡上率は砂浜変形の要因を判断する指標として有用であった。

高波浪時に後浜で生じる堆砂領域の最大および最小堆砂高は、波の遡上高とそれぞれ線形の相関関係にあった。この堆砂現象は、波崎海岸における後浜の海側への拡大の一大要因であった。

謝辞：30年間の鹿島港潮位データの使用に関しては、国土交通省 関東地方整備局 鹿島港湾空港整備事務所にて許可して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣篤・竹淵勉(1989)：前浜における底質粒径の時空間変化とバームの形成機構，海岸工学論文集，第36巻，pp. 359-363.
- 有働恵子・武若聡(2001)：後浜の地形変動に関する研究，土木学会論文集，No. 677，II-55，pp. 175-187.
- 有働恵子・山脇秀仁・伊東啓勝(2005)：後浜の地形および底質粒径変化に及ぼす汀線変化の影響，海岸工学論文集，第52巻，pp. 511-515.
- 加藤一正・柳嶋慎一(1992)：長周期波によるバームの侵食，土木学会論文集，No. 452，II-20，pp. 41-50.
- Bagnold, R. A. (1941)：The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, London, 265 p.
- Guza, R. T. and E. B. Thornton (1981)：Wave set-up on a natural beach, Journal of Geophysical Research, vol. 86, pp. 4133-4137.
- Guza, R. T. and E. B. Thornton (1982)：Swash oscillations on a natural beach, Journal of Geophysical Research, vol. 87, pp. 483-491.
- Owen, P. R. (1964)：Saltation of uniform grains in air, Journal of Fluid Mechanics, vol. 20, pp. 225-242.