

捕砂・留砂機能を有する植生による砂浜の維持システムに関する研究

仲 座 栄 三*・ 津 嘉 山 正 光**・ 砂 川 勇 二***・ 大 山 幸 徳****

1. はじめに

沖縄県下の自然海岸は、白砂青松の言葉のごとく、南国特有の熱帯植物とまばゆいくらいの白砂、そして七色に彩られたサンゴ礁の海からなっている。こうした自然の海岸の砂浜は、強風や暴浪による侵食を受けながらも、自然の維持システムによって安定している。しかし、最近では、このような自然海岸の多くが急速な沿岸開発によりその自然維持システムを壊され、徐々に海岸の様子が変化しつつある。一般には、海岸護岸や防波堤など海岸構造物等の建設により、その周辺の砂浜が急激な変化を受けることが多い。しかしながら、沖縄県下では最近の海洋性リゾート開発ブームにより自然海岸の多くが未だかつて経験したことのない大規模かつ急速な開発がなされつつある。このような状況下で起った、新たに建設された人工ビーチにおける砂浜の消失は、波による侵食作用よりも、むしろ風による飛砂現象によってもたらされたものと言われている。

本研究は、例えば Headland defence work が波に対する砂浜の自然管理システムから学んだと同様に、飛砂に対して捕砂・留砂機能を有する植物による砂浜の自然管理システムに学び、今開発されつつある海岸域における海岸地形と海岸林とのあり方に関する基礎資料を得ることを目的としている。

2. 調査海岸の概要及び調査方法

現地観測の対象とした海岸は、図-1 に①～⑦の記号で示す沖縄本島内の7カ所の自然海岸であり、砂浜が植生によって管理されていると思われる海岸を対象とした。調査対象とした海岸は、いずれも海岸構造物の設置されていない、自然の砂浜を有する所である。調査海岸は、砂浜沖合に約 300m 幅のリーフを有する海岸である。リーフ上の水深は干潮時ではほぼ 0~1.0m であり（その多くは干出する）、満潮時には 2.0~3.0m となる。現地調査では、砂浜断面及び平面形状を水準測量と

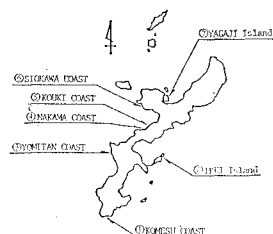


図-1 現地調査位置図

平板測量によって求め、植生の分布状況、植生による留砂量及び砂の粒度分布特性に関する調査を主な調査項目とした。砂の採取は、飛砂量を調べる目的から、砂浜表面から 5cm 程度の深さまでの砂を対象とし、砂浜の横断測線上で約 10m 間隔に行った。

3. 現地調査結果

3.1 海岸林の分布状況

写真-1 は、図-1 に①印で示す米須海岸一帯を捉えた航空写真である。この海岸林は、その分布状況から判断して、人為的に造成されたものと思われる。しかし、造成後自然放置されたため現在は自然植生型の群落の様子を示している。この海岸林の場合、ほぼ4種類の樹種からなる帯状の分布をしており、砂浜より内陸部にかけて、ヒルガオ科などによる海岸草本帯 (Sandy herbs-zone)、アダン林 (Pandanus scrub)、モクマオウ林 (Casuarina forest) とから成っている。図-2 は、この海岸の断面及び植生の分布状況の概念図を示している。また、写真-2 は、海側から海岸林を見た状況である。海岸草本帯は、図示のとおり後浜の後端にフロントを有し、アダン林で覆われるあたりで消えている。今回調査した東海岸における植生の殆どがこのような群落状況であったが、特に、図-1 に②で示す伊計島の東海岸の場合、アダン林とモンパノキ林及びクサトベラ林とが混在している。また、西海岸における植林の多くは、十分発達したアダン林がなく、幅の極めて狭い海浜草本帯の直後にモクマオウが群生しているという状況である。

写真-3 に西海岸における海岸林の代表例として、図-1 に⑦で示す屋我地海岸における植生状況を示した。

* 正会員 工博 琉球大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 琉球大学教授 工学部土木工学科

*** 琉球大学大学院工学研究科

**** 琉球大学大学院工学研究科

写真-2 及び 写真-3 に示すとおり、海側から見て林帯の殆どは、樹木あるいは下層植生によって占められており、林分密度はいずれの海岸でも密の状態であると言える（林分密度の定義は、中須賀らを参考にした、1982）。

写真-4 は、アダン、モンパノキ及びクサトペラが混在している状況を示している。写真-5 は、アダン木の葉の部分拡大したものである。これらの海岸植物は、極めて対塩性及び対風性に優れていると言われており、沖縄の殆どの自然海岸に多く見られる。特に、アダンは海崖など過酷な条件下でも十分発達した海岸林を形成している。モクマオウ、アダン、クサトペラなどに関する植物学的な詳細は文献等を参照していただきたい。



写真-1 米須海岸における砂浜及び植生状況

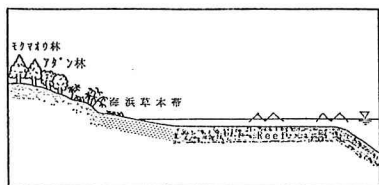


図-2 米須海岸の断面図及び植生分布状況



写真-2 米須海岸における植生状況



写真-3 屋我地海岸における植生状況

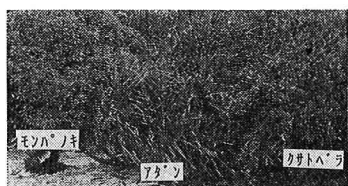


写真-4 沖縄における代表的な海岸林

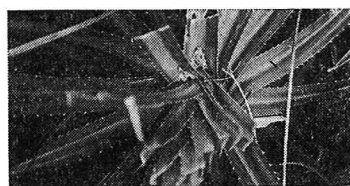


写真-5 捕砂機能が最もすぐれている「アダン」の拡大写真

3.2 砂浜の粒度分布

図-3 及び 図-4 は、植生内の砂丘及び植生フロントと汀線との中間位置における砂の粒度分布（粒径加積曲線）を示している。粒径加積曲線より求めた中央粒径と均等係数（ d_{60}/d_{10} ）を表-1 に示す。均等係数 U_c は、粒の揃い具合を示す指標であり、均等係数が小さいほど粒の揃った砂浜であることを意味する。図-3、図-4 及び 表-1 に示すとおり、植生内とその前面砂の間には、粒径で $0.15\text{ mm} \sim 0.3\text{ mm}$ の違いがある。また、均等係数の値も植生前面砂に比較して植生内の砂は、小さくなっており、比較的粒の揃った堆積砂といえる。調査対象とした海岸における砂浜の中央粒径は、海岸により変化しているが、これはリーフ上の造礁サンゴの種類や波浪及び海岸形状によるものである（詳細は、仲座ら、1991）。他県における砂浜の中央粒径は、一般的に $0.2\text{ mm} \sim 0.4\text{ mm}$ 程度と言われるが、表-1 に示すとおり沖縄における砂は比較的荒いものといえる。

以上の結果より、植生前面（すなわち、植生前と汀線との間にある）砂と比較して植生内の砂は中央粒径が小

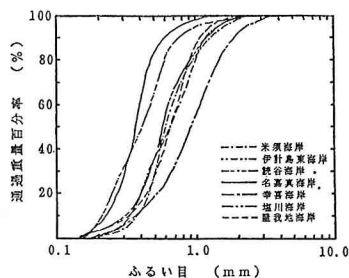


図-3 粒径加積曲線（植生内砂）

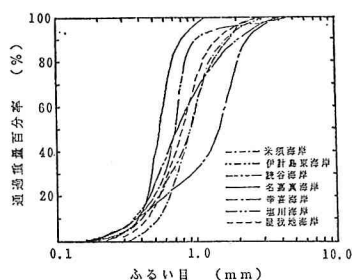


図-4 粒径加積曲線（植生前砂）

表-1 ふるい分け試験を行った試料の中央粒径 d_{50} 及び均等係数 U_c

砂採取海岸		米須	伊計東Ⅰ	伊計東Ⅱ	伊計西	読谷
d_{se} (mm)	植生外砂	0.91	0.79	0.85	0.86	0.71
	植生内砂	0.59	0.55	0.63	0.78	0.40
U_c	植生外砂	1.96	2.02	2.55	1.88	2.11
	植生内砂	1.88	1.91	2.09	1.84	2.19

砂採取海岸		名嘉真	幸喜	塩川	屋我地	
d_{se} (mm)	植生外砂	0.55	1.47	0.71	0.77	
	植生内砂	0.38	0.91	0.56	0.64	
U_c	植生外砂	1.55	5.00	2.43	1.99	
	植生内砂	1.74	2.95	2.03	1.85	

さく、粒の比較的揃った均一の砂になる傾向にあることがわかる。逆に、植生前面の砂は、風により粒径が小さく比較的軽い砂が飛ばされ、径が大きく重い砂が残っているものと判断される。すなわち、自然海岸においては、風によるフルイ分け作用がかなり大きいことがわかる。

3.3 植生内の砂浜断面形状

図-5 は、現地調査によって得られた海岸の横断面をまとめて示したものである。図中、白抜ききの印が沖縄本島東海岸の横断面表を示しており、黒塗りの印が西海岸に対応している。写真-6 は、図-5 中に Photo. 6 と記した付近の植生を示している（調査海岸番号②）。いずれの海岸断面も、沖波有義波高 3 m 程度の波の最大打ち上げ高の位置までは、砂浜勾配は殆ど一致している（波の打ち上げ高に関しては、与儀らを参照，1990）。しかしながら、東海岸の場合は、バームの位置を越えた所辺り、すなわち植生群落のフロント付近から急激に砂浜勾配が増大し、西海岸の断面形状と大きく異なっている。東海岸の砂丘頂点の高さが D.L. +12 m を越えることから、砂丘頂点付近の砂が波によってもたらされたとは考えにくい。すなわち、植物群落内の堆砂の殆どが、風の作用による飛砂が植生によって補足され、堆積

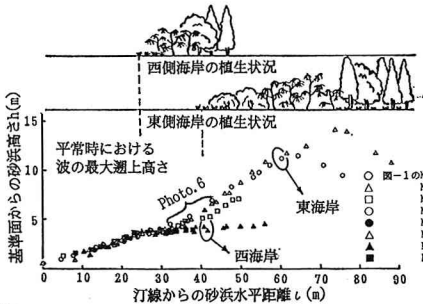


図-5 砂浜断面図

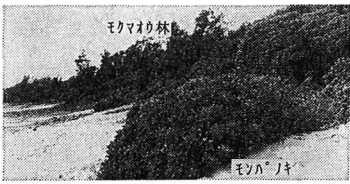


写真-6 砂丘の形成と共に前進する植生フロント

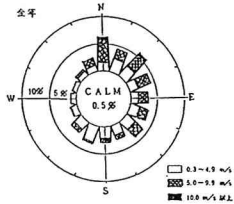


図-6 沖縄本島南部の風向、風速の頻度分布

したものと考えられる。図-6 は、沖縄本島南部の風向・風速の頻度分布を示している（昭和56年～60年）。飛砂現象が顕著となる風速 10 m/s 以上の風は、北から東よりの風及び南から東よりの風が卓越しており、これは砂丘の最も発達している沖縄本島東海岸の法線方向とほぼ一致する。

図-7 は、図-5 に示した海岸断面図を、東西それぞれの海岸に分けて整理し直したものである。ただし、砂浜レベルは、図-5 に示す砂丘頂点の高さで無次元化しており、汀線からの距離は汀線と砂丘頂点までの水平距離で無次元化してある。図示のとおり、無次元表示された砂浜横断面は、東海岸と西海岸とに分類され、海岸の所在場所に関係なく殆ど相似形になっていることがわかる。このように、沖縄本島の東西海岸が、それぞれ独特な砂浜の相似形を有するのは、それぞれの海岸における海岸植物群落の構成樹種がどのようになっているか、あ

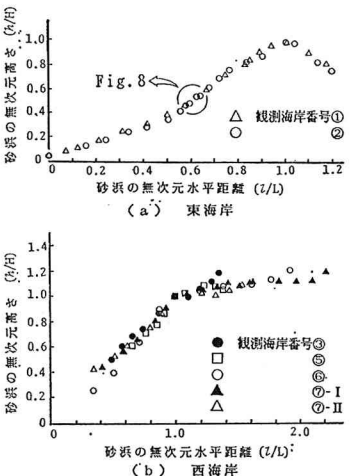


図-7 無次元断面

るいは年間を通して風向・風速の頻度分布がどうかというに関係しているものと判断される。

いずれにしても、これらの海岸における植生内の砂浜は極めて安定しており、新たに開発される海岸における造林などは 図-7 等に習った方がより良いと考えられる。

3.4 孤立海浜樹木による捕砂・留砂量

図-8 は、図-7 中に Fig. 8 を表示した位置にある直径約 5 m の一本の孤立植物（モンバノ木一本）による捕砂・留砂機能を示したものである。図-8 中、で示す部分が植物の枝葉を示している。また、で示す領域は植物から離れた砂浜の平均的な断面であり、で示す植物で覆われている小さな砂丘は、ここで示す孤立植物によって捕捉され保留された飛砂量を示している。図-8 に示す孤立植物の場合、捕捉・保留された飛砂量は、堆砂高さにして 1 m 以上にもなっており、植生による捕砂・留砂機能の高いことを示している。また、孤立植生による砂浜の保護領域は、ほぼ植生の葉によって包み込まれた範囲であることが分かる。

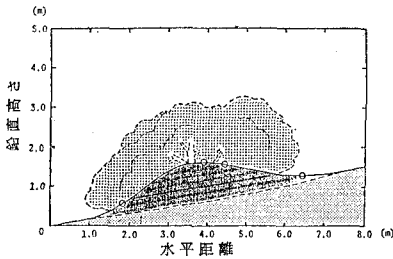


図-8 植生による捕砂・留砂状況

3.5 強風時における飛砂量

強風時における飛砂量の予測式は、Bagnold 及び河村らの式を初めとして数多く提案されている。しかしながら、これらの式を実際に用いる場合、風や砂浜の状態など地域特性に大きく影響される物理量の評価が難しいため、極力現地データとの比較が必要とされている。

図-9 は、図-10 に示す米須海岸において、台風 T 9012号の接近時に観測した飛砂量の鉛直分布を示している。飛砂量の測定には、高さ 2 m のポールに 20 cm 間隔で取り付け紙コップを用いた。なお、観測当時、砂浜上層の湿潤度は約 17% 程度であり、地表面より 2 m の高さにおける平均風速は、11.9 m/s であった。図示のとおり、飛砂の鉛直分布は高さによって指数曲線的に変化しており、飛砂現象が極めて地表面近くでの現象であることを示している。このことは、先に示した植生内の砂浜形状が、東西海岸で異なることの理由の一つでもある。すなわち、沖縄本島東海岸では、海岸植生のフロントにアダン林が十分成長しており、このアダン木の

葉は地表面まで達しているのに対し、西海岸では地表面近く捕砂に有効な葉の茂みを有しないモクマオウ林が生息している。そのため、西海岸の海岸林に比較して東海岸の海岸林群の方が、飛砂を有効に捕砂及び留砂しているものと思われる。

次に、調査対象とした海岸における飛砂量の推定を試みる。風速分布として、Plandtl の式を用い、飛砂が風速に及ぼす影響に Zingg の実験結果を用いると、地表面高 2 m の位置における風速と摩擦速度との関係は、次式によって与えられる。

$$U_{200} = 5.75 U_* \log_{10} (200/d) + 8.94 d \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 U_{200} は高さ 2 m における風速であり、 d は砂の中央粒径である。

Bagnold は飛砂量算定式として、次式を与えている。

$$q = C(\rho/g) \sqrt{\frac{d}{D}} (U^*)^3 \quad (\text{Bagnold}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ : 空気密度、 D : 標準粒径で 0.25 mm である。また、係数 C は自然の粒径分布の砂に対しては、1.8 程度と言われる。

図-10 は、これらの式を用いて算出した風速による飛砂量の変化を示している。図示のとおり、飛砂量は風速 8 m/s ~ 13 m/s 辺りで急激な変化を示している。すなわち、この範囲を境に飛砂の有無が判断されることになる。図-10 中に、図-9 で示した飛砂量の現地観測値を●印で示した。観測値は、砂の状態がいくらか湿潤状態にあったことから予測より若干小さめの値をとっているもの（勿論、飛砂捕捉器の捕捉率の問題もある）。

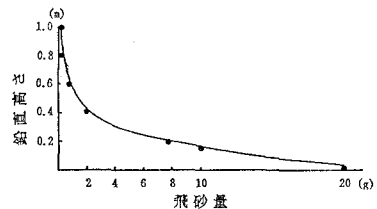


図-9 飛砂量の鉛直分布図

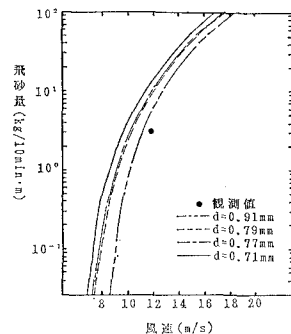


図-10 理論計算による飛砂量と風速との関係

予測値との一致度は良いと言える。また、飛砂のみに対する防災という目的からは、植生自体の防風効果の面からも地表面付近まで葉の茂った低木が有効と考えられる。

図-10で示す予測値を用い、風速 10 m/s の風が吹き続け、飛砂の全てを植生が捕捉したと仮定すると、図-8に示した植生内の堆砂量は、約39時間で堆積することになる。現地海岸の場合、風速 10 m/s を越える風速は、累計では明らかにこの時間以上吹いているものと考えられる。この植生内の堆砂状態はほぼ飽和状態にあると考えられる。そうすると、植生の規模・捕捉能力及び成長速度などによっては、こうした孤立植生によって図-8に示す堆砂量よりも更に大量の捕砂・留砂も可能と考えられる。こうした孤立植生は、人工的に造成することも考えられ、景観や夏場の木陰としての利用と同時に、飛砂に対する砂浜の管理にかなりの効果を発揮するものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、捕砂・留砂機能を有する植生による自然管理システムによって維持されていると考えられる自然海岸の現地調査結果を基に、沖縄本島における海岸特性

について検討した。その結果により、沖縄本島の東海岸と西海岸とは、それぞれに特有な海岸形状の相似形を有していること、及びそのことが飛砂に対する植生の捕砂・留砂機能に基づく砂浜管理システムによっていることなどを明らかにした。今後は、海岸林の対塩性及び対風性などを明らかにすると共に、海岸林樹種の組み合わせ及び樹木の配置と捕砂・留砂特性を把握していく予定である。また、金属材料を用いた海岸構造物の錆の問題に対しても、飛砂による表面研磨作用が効いていると考えられ、これに関しては現在検討中である。

参考文献

- 亜熱帯林研究会 (中須賀常雄ら), (1980): 亜熱帯林, p. 91.
仲座栄三・津嘉山正光・赤嶺好祐・小林智尚 (1991): リーフ海岸における堆砂特性と新たな人工ビーチの創造, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 326-330.
中須賀常雄・馬場繁幸・川村博樹 (1986): 沖縄の海岸林に関する研究 (Ⅲ), 琉球大学農学部学術報告, 第33号, pp. 211-219.
中須賀常雄・馬場繁幸・佐藤和昌 (1986): 沖縄の海岸林に関する研究 (Ⅱ), 琉球大学農学部学術報告, 第33号, pp. 231-239.
本間仁監修/堀川清司編 (1985): 海岸環境工学, p. 582.
与儀成也・仲座栄三・津嘉山正光 (1990): ステップ型海岸における波の遡上特性に関する研究, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 254-255.