

リーフ海岸における海面上昇起源の急激な海浜変形 ——宮古島西部に位置する前浜海岸の例——

菊池 昭男* ・宇多 高明** ・西 隆一郎***
三波 俊郎**** ・古 池 鋼**** ・芹沢 真澄*****

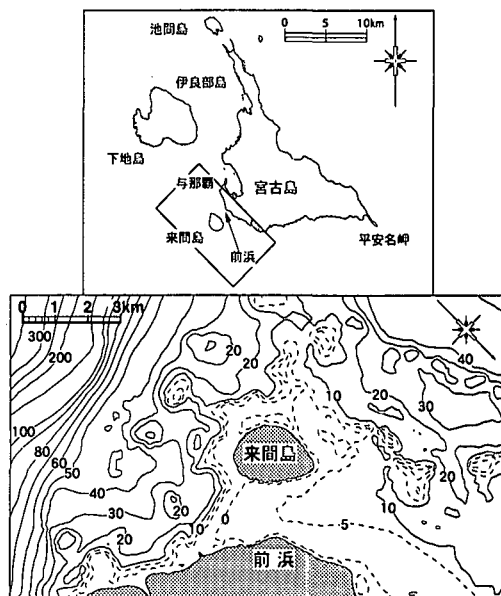
宮古島南西部にはリーフに囲まれ景観が良好な前浜(まえばま)海岸がある。この海岸では 1990～1997 年に激しい侵食が起き、浜崖が形成されるとともに背後のモクマオウ林が大量に倒伏した。しかしその後海浜の回復が進んだ。本研究は前浜海岸でのモクマオウ林の前進・後退は平均海面の変動に起因する汀線の長期変動に関係することを明らかにした上で、近年の集中的な災害は平均潮位が高い時期に台風が宮古島に来襲し、かつ高波浪が満潮時に作用したことが要因であったことを明らかにした。

1. ま え が き

宮古島南西部にはリーフに囲まれ、景観が非常に良好な前浜(まえばま)海岸がある。この海岸は来間島の背後に形成された舌状砂州であり、毎年多くの観光客を呼び寄せる貴重な観光資源となっている。この海岸は 1990 年から 1997 年まで激しい侵食に見舞われ、浜崖が形成されるとともに背後のモクマオウ林が大量に倒伏した。しかしその後海浜の回復が進み、以前と変わらない利用が行われるようになった。前浜海岸の海岸侵食について仲座ら(1996)は、顕著な侵食は 1994 年の台風 13 号通過に伴い始まったこと、そしてその後度重なる台風接近に見まれて侵食がさらに加速し、1995 年台風 14 号の際には防風林のかなり内部まで侵食を受けるに至ったことを明らかにした。さらに過去 20 年間に宮古島の西側と東側を通過した台風に大別した結果、大型の台風が宮古島の西側を 1994 年と 1995 年に集中して通過したことを明らかにし、宮古島を中心とした台風のコースが波の入射方向を変化させ、これに沿岸漂砂の応答が起きて前浜海岸の侵食は始まったとした。本研究はこの研究をさらに発展させたものであり、モクマオウ林の前進・後退は汀線の長期変動に関係し、汀線の長期変動は平均海面の変動と関係することを明らかにした上で、近年の集中的な災害は平均潮位が高い時期に台風が宮古島に来襲し、かつ高波浪が満潮時に作用したことが要因であったことを明らかにする。

2. 宮古島南西部に位置する前浜海岸の地形概況

図一は海上保安庁水路部の海図より作成した宮古島南西部の深浅図である。水深の基準は基本水準面(D.L.)である。来間島と宮古島の間には浅いリーフが広がっており、このリーフは宮古島の西側に位置する伊良部島と



図一 宮古島南西部の深浅図

下地島方面へと延びている。前浜海岸の南側には湾入した深みが迫っており、南シナ海からの高波浪はリーフ端で碎波した後、リーフを通過して前浜海岸に入射する。これに対して前浜海岸の北西側は浅いリーフであり、また伊良部島と下地島が冬季の北西からの波の入射を遮蔽するため外海からの波浪は直接作用せず、入射波は浅いリーフによる碎波・屈折変形を受ける。しかし前浜海岸から下地島方向へは約 8 km のフェッチがあるために、リーフ内で発達する波浪の作用も無視できない。

写真一は国土地理院による 1995 年 1 月撮影の空中写真である。前浜海岸沖にはリーフが広がる。来間島の南端から ENE 方向へリーフエッジが直線的に延びている。リーフエッジの水深は D.L.+0.7 m 程度と非常に浅いので、外洋からの入射波がリーフエッジ上で碎波している状況が見てとれる。リーフエッジから前浜前面にかけてのリーフの水深は D.L.-2.0 m 以浅であるが、リーフエッジよりも 2 m 程度深い。写真ではリーフエッジからリーフ面上にかけて北西方向へと延びた多くの筋目模

* 正会員 (有)コスタルテクノ
** 正会員 工 博 国土交通省国土技術政策総合研究所研究総務官
*** 正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科
**** 海岸研究室(有)
***** 正会員 海岸研究室(有)



写真—1 宮古島前浜～来間島周辺の空中写真（1995年1月撮影）

様が見られる。これらの筋目模様は、その起源について谷本ら（1989）が海浜流の数値計算で確認したように、外洋から来襲する波浪がリーフエッジ上で碎波することによって生じた海浜流のパターンを表していると考えられる。さらに前浜海岸の舌状砂州先端の水中部には、北西方向へ砂嘴状に延びる砂の堆積域が見られる。さらにそこから北西側の海岸線に沿った海底部にも白っぽい砂の堆積域が広がっている。これらもまたリーフ面上で卓越する北西方向の流れにより前浜海岸の砂州の一部が運ばれ堆積したものと考えられる。

前浜海岸の底質特性については2001年11月9日に現地調査を行った。後述の汀線変化図（図—2）に示すように前浜海岸の東急リゾートホテルの前面付近から来間前浜港までの約0.9 km 区間において5測点を設けて汀線部の底質を採取し、JISA 1204の方法にしたがって粒度分析を行った結果によれば、汀線付近の構成材料は中央粒径が0.28 mm、均等係数が2.26である。

3. 新聞記事に基づく災害状況の調査

前浜海岸の侵食についてはこれまで被災のたびに新聞報道がなされてきた。表—1には新聞記事を来襲した台風とともに一括して示す。これによれば、侵食災害が新聞で報道されたのは1990～1997年にかけてである。それも共通して海岸中央部（舌状砂州の頂部）から南側の前浜港防波堤区間で侵食が著しく進んだことを報じている。また新聞報道は台風時期に集中しており、侵食は台風時期に進んだことを示している。新聞記事を時期ごとに概観すると、まず1990年には前浜海岸南部で浜崖侵食

表—1 新聞記事による被災状況の履歴

年	月日	台風	記事要約
90	8/25	T 9012	砂がえぐりとられ段差ができた。
94	8/25	T 9413 T 9416	モクマオウが大規模に倒伏したのは初めてである。前浜後橋から西側約400 mにわたり、50 cm～1.5 mの深さでえぐりとられる。
95	9/3	T 9508	東側の海岸が300 mにわたり侵食された。
	7/31	T 9609	3月に築かれた砂養や防風林が押し流される。
	8/1	T 9609	東側は侵食、西側は砂が流れ込んだ。1万個の土嚢が流されてしまった。
	8/2	T 9609	モクマオウ50本、イソフジ等900本が倒伏し、遊歩道が220 mにわたり損壊し崖状になる。「ウィンディまいばま」のバルコニー部分も侵食。
96	8/8	T 9609	護岸が100 kmにわたり大規模に決壊し、背後の陸地も数百mにわたって侵食された。
	9/25	なし	鉄鋼と横板を組み合わせた保護壁を設置し、上部から砂を覆い被せる工法を採用し、恒久対策を検討するまでの仮設的なものとして工事を開始した。
	10/1	T 9621	T 9606以来、再び来間島への送水管が20 m以上ありわになった。
	6/28	T 9708	昨年設置した侵食防護壁を覆うために運び込まれた海砂1,700 m ³ のうち、約1,000 m ³ が流れ、砂浜に段差が生じ、埋設してあった来間島への送水管も露出した。
	8/8	T 9711	前浜の侵食は、台風コースの変化によって生じる南からの波が原因と分析されており、今回の台風は北西から波が寄せていたため、関係者は砂が堆積するのではと期待していた。しかし、再び砂浜が侵食された。
97	8/8	T 9177	前浜港から東急リゾート西側まで、東西全域で砂が流出した。特に東側部分は板壁がさらにむきだしになり、砂浜は60 cm低下し、来間へのパイプラインは完全に地中から露出した。
	8/9	なし	前浜海岸は1989年6月から96年12月の間に39,300 m ³ の砂が流出し、西側の海岸では23,700 m ³ の砂が増えている。94年以降宮古島の西側を通過する台風が多く、その風向と潮流が影響したとみられる。数十年サイクルで砂浜が成長し、後退するメカニズムがあるようだ。景観に配慮との声も強く、保全と保護のジレンマがある。
	8/13	なし	前浜海岸の侵食問題に対する抜本的対策は見つからず、結論は先送りとなった。

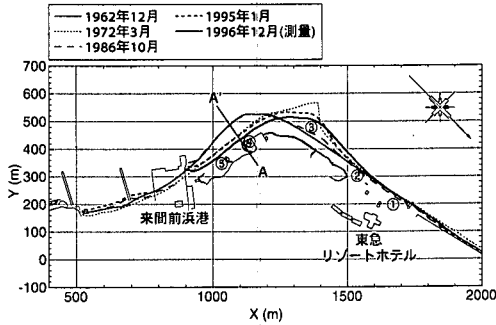


図-2 汀線位置の変遷

が発生した。1994年では前浜港防波堤から北約400mが大きく侵食され、大規模にモクマオウが倒伏した。1995年には侵食がさらに進み、比高約2mの浜崖が形成された。1996年に入って侵食はさらに進み、著しい侵食域が海岸中央部にも及び、8月の台風9号では1990年代に入って整備された海浜背後のリゾート施設に被害が及んだ。また応急対応として4月に積まれた土壌1万個のほぼ全てが流出した。モクマオウ林は倒伏し、背後地の遊歩道は損壊した。9月には来間島への送水管が露出した。そこで暫定対策としてH鋼と横板を組み合わせた板柵の侵食防護柵が設置され、防護柵の前面と送水管は覆砂された。しかし翌1997年8月の台風で覆砂は流出した。このように1994～1996年には侵食が最も深刻な状況に至った。しかし1997年9月以降、侵食の新聞報道は見られなくなる。これは1997年以降南側の海岸で砂浜の回復が進んできたためである。

4. 前浜海岸の汀線変化

1962年から1995年までに米軍および国土地理院によって撮影された5組の空中写真をもとに、前浜海岸における汀線変化を含む海岸状況の変遷を調べた。海岸線形状と海岸に設置された各種構造物の位置、さらには植生帯外縁線の位置を読みとると同時に、1996、1997年実施の汀線測量からも汀線の読みとりを行った。図-2には汀線変化を示す。全体として舌状砂州部分では汀線の変動量が大きい。舌状砂州から離れた前浜港南側や東急リゾートホテル周辺などでは汀線はほぼ安定している。舌状砂州の形状は $x=1,200$ m付近を中心に北側に頂部を有するもの(1962, 1986年)と南側に頂部を持つもの(1972, 1995, 1996年)の2パターンがある。注目されるのは構造物が設置される以前の1962年にはそのピークが南西側に傾いていたが、1972年には逆に北東側に鋭角状に突出していることである。すなわち前浜海岸の舌状砂州はもともとの自然状態においてもこのように左右に大きく変動する特性を有していたことが特徴であ

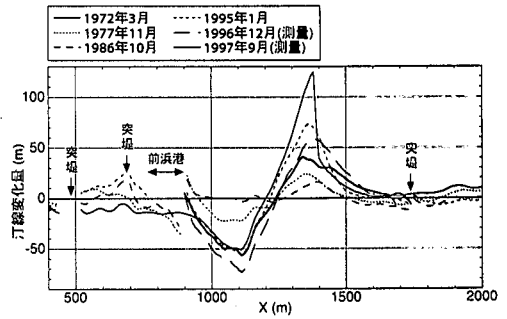


図-3 汀線変化量 (1962年基準)

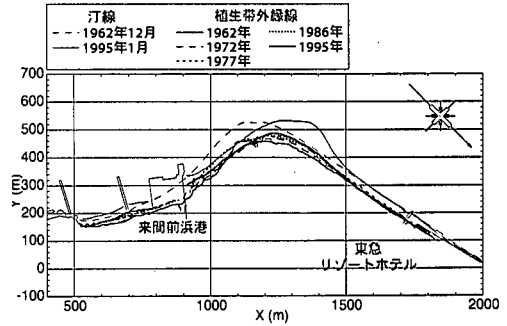


図-4 植生帯外縁線位置の変遷

る。また $x=1,200$ m地点以南において侵食による被災が既に大きな問題となっていた1995年時点の汀線は1972年当時とほぼ同じ位置であったことも注目される。また舌状砂州の南側で最も侵食が進んだ1996年12月では1995年1月よりもさらに約20m汀線が後退している。

図-3は1962年を基準とした汀線変化量の沿岸方向分布である。図には1996年12月と1997年9月の海浜測量の結果も合わせて示す。 $x=1,100$ mと $1,350$ mに変動量の大きなピークがあり、それらは舌状砂州が南北に移動したときの砂州頂部の位置に対応している。ピーク位置での変動幅は、極端に大きな変動の見られる1972年を除けば約70mである。全体として見ればほぼ $x=1,200$ m付近を中心とした正弦曲線のような変動である。南側では前浜港付近、北側では $x=1,600$ m付近が汀線変動の収束地点である。南西端には前浜港があるが、その護岸に隣接する場所では舌状砂州から離れる方向の沿岸埋砂が阻止された場合の汀線変化が見られる。しかしそこでの汀線変化量は中央部の汀線変動量と比較して小さい。

図-4は植生帯の外縁線位置の変化である。植生帯外縁線は舌状砂州中央部の汀線変動域と同様に変化が大きく、周辺部では変化が小さくなる傾向がある。舌状砂州背後では、1962年から1986年にかけて全体的に外縁線

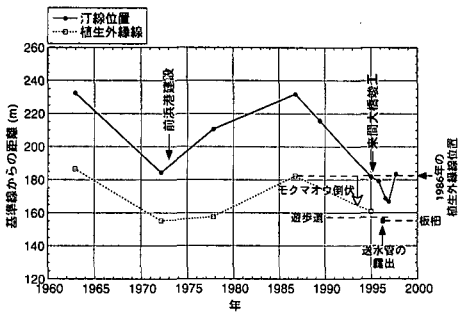


図-5 汀線および植生帯外縁線位置の時間的変化 (断面 A-A')

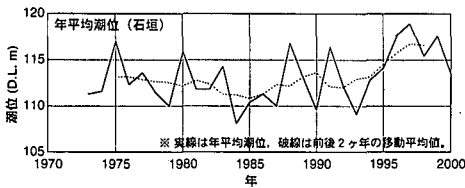


図-6 石垣島の年平均潮位の変遷

は前進傾向を示していたが、舌状砂州の南側では1995年に大きく後退している。これは1994年に来襲した台風による侵食によってモクマオウ林が多数倒伏したことによる。

舌状砂州中央部の著しい汀線変動が見られる区域のうち、南西側に測線 A-A' を設定して汀線の経時変化を調べた。図-5 は測線 A-A' における汀線変化である。図には周辺海域で行われた主な海岸工事の時期も示すが、前浜港、来間大橋の建設が海岸工事として進められると同時に、陸域では遊歩道の整備、さらには侵食対策としての板柵の設置なども行われた。測線 A-A' の汀線は1962年から1972年まで後退したが1987年までは逆に前進している。その後1997年まで急激な汀線後退が生じたが、1997年以降再び前進している。しかし1972年の汀線位置は侵食が問題となっていた1995年の汀線位置とほぼ同一であった。データ密度が小さいために明確ではないが、汀線変動には約20年の周期を持っているように見える。図には植生帯外縁線位置の経時変化も示すが、植生帯外縁線には汀線と同じモードの変化が見られる。汀線位置と植生帯外縁線の距離を浜幅と見なせば、その幅は1986年以前には30~50 mを保っていた。1986年は汀線および植生帯は最も前進していたが、その後の侵食に伴って汀線が背後の植生帯に迫り1994年以降、植生帯のモクマオウが多数倒伏する被害が発生した。また汀線から海浜公園内の遊歩道までの距離は1995年で約25 m、1996年で約10 m (遊歩道の被災・送水管の露出) となり、板柵の設置により背後地を防護することになった。その後1996年から1997年にかけて浜幅は回復傾向にある。

最も侵食が進んだ1996年の汀線位置は1986年の植生帯外縁線よりも約15 m陸側にまで達したが、本来この領域は汀線が最も変動する領域に相当している。このような変動域において、汀線および植生帯の前進時期にあわせて背後地の利用を促進したことがこうした被害の間接的要因となったことは否定できない。

以上のように、前浜海岸では長期変動はあるものの1997年までの急激な侵食に匹敵する汀線後退は1972年にも生じている。このことは1997年における著しい侵食は人為的というよりも自然的要因に起因すると判断され、過剰な防護措置を取らなかった対応は、自然の外力で汀線が変動できるバッファゾーンを残したことになり、結果的にみれば前浜海岸という沖縄でも貴重な砂浜海岸の人工化を防止する上で有効であったと考えられる。

5. 舌状砂州の変動機構

前浜海岸には南北両側から波の入射が可能である。南側からの入射波は外洋からのうねり、とくに台風起源の波浪である。一方、北側からの入射波は冬期風浪と、来間島の北側を回り込んで来る外洋波浪の回折波がある。これらの波浪は海岸線に対し互いに逆方向からの入射となる。前浜海岸の舌状砂州は、このような左右からの波浪作用のバランスによって成立していると考えられる。そして砂州の左右の変動はこの波浪バランスが変化するためであり、片方の波浪が相対的に強まるとそれに応じて砂州は左または右に移動すると考えられる。これについては仲座ら (1996) が既に指摘している。

この場合、南北の波作用の強弱の生じる理由が問題となる。これについて仲座らは侵食が顕著に進んだ時期には西側を通過する台風の頻度が多い傾向にあるとして侵食と台風コースとの関連性を指摘し、さらに台風時に満潮が重なると侵食が進むことも指摘した。

当海岸の汀線の長期変動現象を説明するためには、長期間の潮位の変化が重要と考えられる。そこで宮古島の南西120 kmに位置する石垣島における1973~2000年の年平均潮位の変化を調べたのが図-6である。図中の点線は2年の移動平均値である。平均潮位は約20 cmの範囲で緩やかに変動している。大局的に見ると、平均潮位は1975年~1985年に低下し、1985年~1997年まで上昇した後、1997年以降は再び潮位が低下する傾向がある。この長期的変化と汀線変化は良く対応しており、潮位が上昇する期間には測線 A-A' では汀線が後退し、潮位低下期にはこの逆となっている。

次に、1990年以降前浜海岸に被害をもたらした主要な台風について潮位・波浪条件・コース等について分析を行った。前浜の被災状況を報道した新聞記事 (表-1) に

表-2 前浜海岸へ被害を及ぼした主な台風

台風	被害	最接近日時		平良港の天文潮		潮位	中心気圧 (hPa)	台風 通過位置
		月日	時	近傍の 満潮時刻	満潮位 (D.L.cm)			
9012	×	8月19日	03h	06h	195	大潮	950	W
9413	×	8月7日	21h	20h	185	大潮	985	W
9416	×	8月20日	21h	19h	178	大潮	985	W
9508	×	—	—	—	—	大潮	945	SW 沖合
9514	×	9月23日	04h	06h	184	大潮	955	W
9609	×	7月31日	08h	08h	213	大潮	925	W
9621	△	9月28日	22h	20h	193	大潮	955	直下
9708	△	6月27日	02h	00h	163	小潮	975	E
9711	△	8月6日	20h	21h	178	中潮	960	E
9713	なし	8月17日	23h	19h	185	大潮	950	E-N

※「被害」の×、×は前浜の侵食の程度を表す。△は実質的侵食規模が不明なもの。

よれば、1990年以降に前浜海岸に被害を及ぼした台風は全部で9個ある。表-2はこれらの台風について被害の程度、宮古島に最接近した時刻とその近傍の満潮位（天文潮）、最接近時の中心気圧、宮古島に対する通過位置を示したものである。被害を及ぼした台風はいずれも1990年、1994～1997年に来襲したことがわかる。新聞報道によれば1996年の9609台風が最も被害が甚大であった。表で注目されるのは被害台風の接近時はほとんどが大潮であり、最接近時刻はいずれも満潮時刻から3時間以内と近いこと、潮位が高かったことである。満潮位（天文潮）はほとんどが175 cm以上であり、特に9609台風の最接近時の満潮位（天文潮）は+213 cmと最大であった。実際に生じた潮位は表の天文潮に加えて台風による気圧低下や吹き寄せによる潮位上昇分が加わり、天文潮よりも数十 cm 高く2～2.5 m 程度の潮位であったと考えられる。このように前浜に侵食が生じる際の条件として、潮位の上昇が重要な要因となっていることが分かった。

6. 考 察

本研究では、空中写真をもとに1962年から最近までの汀線の長期的変動について解析した。この結果前浜海岸の舌状砂州は約20年周期の変動を有し、砂州の南側での侵食と北側での堆積が交互に繰り返されていることが判明した。リーフ海岸ではないがこれと同様な砂州のサイクリックな変動は佐渡島の鴻ノ瀬鼻でも観測されている（宇多・山本、1990）。このような地形変化の原因は南側の海岸から北側に、あるいはその逆方向に沿岸漂砂による土砂移動が起こることによる。この現象は構造物の建設以前から見られていることから判断して、もともと当海岸の有する自然現象と考えられる。また汀線の前進・後退に伴い背後のモクマオウの樹林も前進・後退を繰り返している。堆積期には汀線が前進するとともにモクマ

オウの樹林帯も前進する。侵食期では汀線が後退すると、それまで沖に張り出していたモクマオウ林に波が作用することでモクマオウは倒伏して元の状態に戻る。この場合の汀線の変動幅は約50 mである。

1990年代に入って砂州南側の海岸では背後のモクマオウの樹林帯にキャンプ場、遊歩道などの利用施設が造られた。しかしこれらの設置区域はこの変動帯にかかっていたのである。これはこれらの建設時期が偶然汀線とモクマオウ林が最も沖側に張り出していた時期と重なったためである。その後進んだ汀線の後退では、モクマオウの樹林中まで侵食され、モクマオウは倒伏し1996年の台風では遊歩道などの施設まで被災が及んだ。仲座ら（2000）は、海岸整備に関して地域住民へのアンケート調査を行ったところ、最も多い回答は「砂浜や防風林の保護」が38%と最も高く、次いで「生物環境の保護」と「景観への配慮」であり、これらの項目で86%を含めていた。地域住民にとっては砂浜背後の防風林は汀線の長期変動とともにその区域が変化するものとは見られておらず、汀線の前進とともに前進していたモクマオウ林の倒伏は大きな衝撃になったと考えられる。侵食を予測して施設を十分に陸側に後退させて建設すれば被災は免れたかも知れないが、現場で砂浜背後にモクマオウの樹林が発達しているのを見れば安定的な海岸に見えたのも不思議ではない。モクマオウの成長速度は格段に速いために、10年間にわたる砂浜の堆積期間に立派な林が出来上がっていた。その後、板柵によって背後地を防護する対策が行われた。海浜変形によって背後地に被害が生じると一般には突堤や離岸堤など汀線から突出した沿岸漂砂阻止構造物を設置する対策が取られることが多いが、当海岸のように汀線の変動が大きい場所では、そのような行為が加えて侵食を助長させる恐れがある。板柵を用いた対策は堆積に転じた現在ではそれらを飛砂による堆砂に任しておけばよく、この意味から賢明な対応であったといえる。

参 考 文 献

- 宇多高明・山本幸次（1990）：佐渡島、鴻ノ瀬花における海浜の変形、地形、Vol. 11, pp. 13-28.
- 谷本修志・宇多高明・高木利光（1989）：リーフの筋目模様から予見された流れの数値計算による検証、海岸工学論文集、第36巻, pp. 229-233.
- 仲座栄三・津嘉山正光・砂川恵輝（1996）：宮古島下地町前浜海岸侵食はなぜ始まった？災害実態調査を中心として、琉球大学工学部紀要、第51号, pp. 1-13.
- 仲座栄三・津嘉山正光・川満康智・比嘉真弓・大石根光茂・西園公彦（2000）：侵食対策としての海岸整備に関する意識調査、海岸工学論文集、第47巻, pp. 1306-1310.