

リーフに流入する沖縄県億首川の河口閉塞防止対策の検討

Prediction of River Mouth Closure of Okukubi River Flowing into Coral Reef

板屋英治¹・新垣 哲²・宇多高明³・夏目浩和⁴
若松正樹⁵・三波俊郎⁶・古池 鋼⁶・石川仁憲⁷

Eiji ITAYA, Satoru ARAKAKI, Takaaki UDA, Hirokazu NATSUME
Masaki WAKAMATSU, Toshiro SAN-NAMI, Kou FURUIKE and Toshinori ISHIKAWA

The river mouth closure of the Okukubi River in Okinawa Prefecture, flowing into the coral reef, was studied. In this area, the shoreline material was extensively excavated after World War II, resulting in the disappearance of sand beach. Since then, coral sand was naturally supplied from the reef edge, resulting in recovering sandy beach. Sand reached the shoreline was then transported by longshore sand transport due to waves, and the river mouth bar was formed. The river mouth closure associated with this sand accumulation was predicted by the BG model proposed by Serizawa *et al.* (2006). The predicted beach changes are in good agreement with the measured.

1. まえがき

沖縄本島では沿岸の各所にリーフが発達している。沖縄本島中部を東向きに流れる億首川はこのような海岸に流入する河川であり、河口部にはマングローブが繁茂し、環境上重要な位置を占めている。同時に河口沖には広大なリーフが広がり、リーフによる高い波浪減衰機能が発揮されている海岸である。現在、億首川上流では金武ダムの建設が進められており、これに起因する流量の減少が河口閉塞やマングローブ林の変化を起こすのではないかと危惧がある。本研究は、これらの課題のうち、河口閉塞について検討することを目的とする。その際、河口閉塞の主因となりえるのは、ダム下流域の流域面積が1.8km²と小さい億首川からの流出土砂ではなく、リーフ起源の土砂と考えられ、リーフからの供給土砂が海岸線まで運ばれた後、沿岸漂砂によって河口へと運ばれるという形態を取る。この地域では、戦後大規模な海浜土砂の採取が行われ、海浜がほとんど消失したが、その後リーフ起源の砂礫が岸向きに運ばれ、汀線付近に堆積して海浜の復元が進んできた。小林ら(2008)はBGモデルを用いてリーフにおける砂浜の発達について論じたが、同様な考えの下で堆砂過程を調べることににより、当地ではリーフから海岸への供給土砂の定量的評価が可能と考

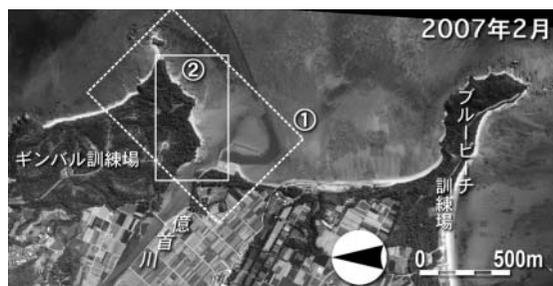


図-1 億首川河口部周辺の空中写真

えられる。このため、億首川河口周辺の汀線変化を空中写真から調べるとともに、2009年2月には海浜縦断測量を行った。さらに、これらの基礎データをもとに、芹沢ら(2006)のBGモデルを用いて地形変化予測を行った。リーフ上における岸向き漂砂はサンゴや有孔虫の生息状況に依存し、長期的には変化しうるものであるが、本研究では過去の実績をもとに将来予測を行った。

最後に、これらの検討に加え、河口閉塞防止案について検討した。

2. 空中写真の比較による海岸状況の変化

検討対象は沖縄本島中部、東海岸に流入する億首川河口部である(図-1)。億首川は、北側を米国海兵隊のギンバル訓練場のある岬により、南側を同じくブルービーチ訓練場によって区切られた長さ1.2kmのポケットビーチの北端に流入する。現況で河口のすぐ南には港湾と、そこから広大なリーフを斜めに横切る航路が伸びている。以下では図-1に示す矩形区域①を拡大し、この区域の経年の地形変化を調べた。

1946年の空中写真を図-2(a)に示す。以下分析を容易にするために、ギンバル訓練場の東端にある岬をA、こ

1	内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所長
2	内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所副所長
3 正会員	工博 (財)土木研究センター常務理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科
4	内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所環境課長
5	内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所環境第二係長
6	海岸研究室(有)
7 正会員	工修 (財)土木研究センターなごさ総合研究室

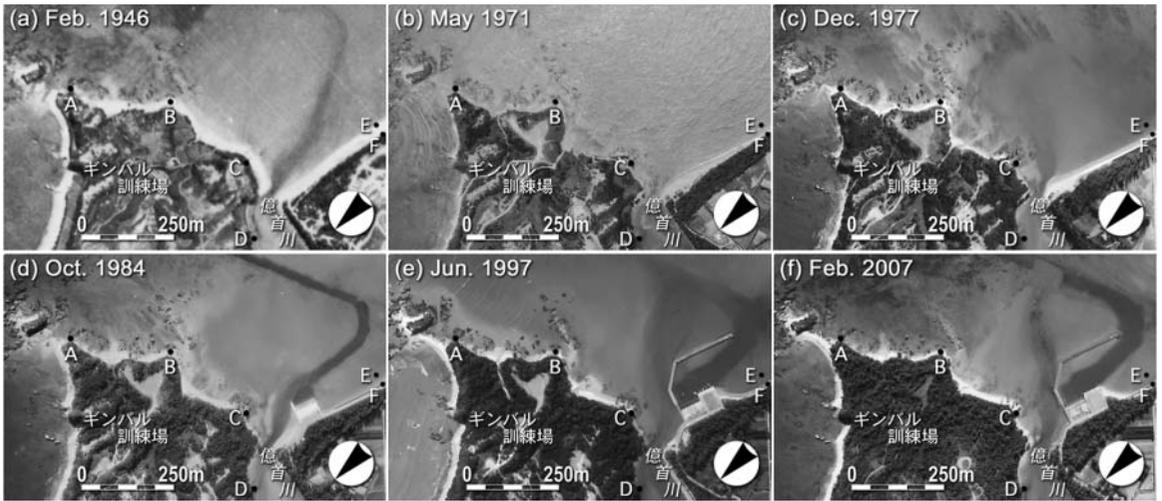


図-2 億首川河口部左岸海浜の空中写真

れより億首川河口に至る区域で沖向きに突出した岩盤を順にB, C, Dとする。1946年には、AからCまで海岸線に沿って砂浜が連続的に延びていた。砂浜幅はAB間では15m程度であったが、億首川河口に近づくにしたがい広がりCでは30mと広がった。億首川河口では、右岸砂州とともに左岸砂州の伸長により河口が閉塞していたことが分かる。しかし海浜はCの西端部を越えて上流側には伸びておらずDでは海浜砂の侵入は起きていなかった。1971年になるとAから億首川河口までの全域で砂浜が消失した(図-2 (b))。右岸河口砂州は同様に形成されているが、河口から南側に伸びる砂浜も大きく狭まった。図-2 (a), (b)には調査区域南端における1946年当時の汀線と植生帯の海側限界をE, Fで示すが、この付近でも砂浜が約20m狭まったことが分かる。この理由は、ここでも海浜で人工掘削が行われたためと推定される。河口左岸の海岸では砂浜が消失した結果、1946年には砂に埋まっていた岩が1971年には海に孤立した形で残された。1977年には、1971年と比べて対象区域の砂浜が復元し始めた(図-2 (c))。とくに岩盤が河口方向へと向かう沿岸漂砂を阻止するBとCの東側での砂の堆積量が多くなった。しかしこの時期には億首川河口左岸には砂州の発達はまだ見られない。河口右岸の海浜では1971年には植生帯の外縁であったFでは植生帯が後退し植生帯が狭まった。1984年では対象区域での砂浜面積の増加が続き、とくにCの東側での砂浜面積の増加が著しい(図-2 (d))。非常に大きな変化が起きたのは河口右岸側海岸である。右岸側には港湾が建設されると同時に、港から当初南に向かい、その後東へと向かう航路が掘られた。港湾防波堤が伸びたことにより億首川の流路は防波堤に沿い、その後航路と合体して流れるようになった。また岩A, B沖のリーフ上には何本もの筋目模様が西向きに伸びてい

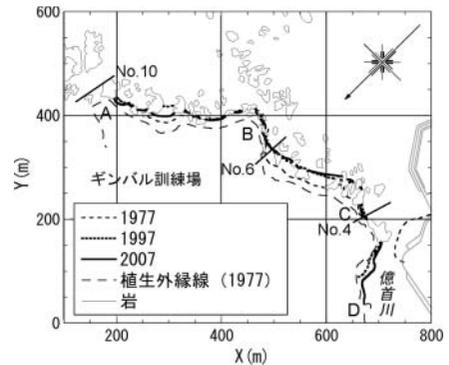


図-3 億首川河口部左岸海浜の汀線変化

るのが確認できる。これより、リーフ上においてリーフエッジから岸へ向かう漂砂があったことが推定できる(谷本ら, 1989)。1997年には、港湾防波堤が億首川の流路を右岸側から阻害するようになったため、億首川河口に続く流路が直線的に伸びるようになった。またAではトンボロが大きく発達し、1984年まで島とAの間にあった細長い流路は砂で埋まった(図-2 (e))。この時期をもって岬先端のAでギンバル訓練場の東海岸と当調査区域は切り離された。2007年では、Cを通過して河口方面へと流れる沿岸漂砂により、河口の左岸砂州の発達が続けている(図-2 (f))。

3. 汀線変化と海浜面積・堆積量の変化

空中写真をもとに、1977～2007年の汀線変化をまとめたのが図-3である。岬先端のAと岩Bの間では、1977年から1997年までに砂浜がほぼ回復したが、その後わずかではあるが侵食傾向にある。BC間でも1977年から1999年までに砂浜が広がったが、岩C付近で汀線が前進しており、Cを超えた河口方向への砂移動が起きたと見られ

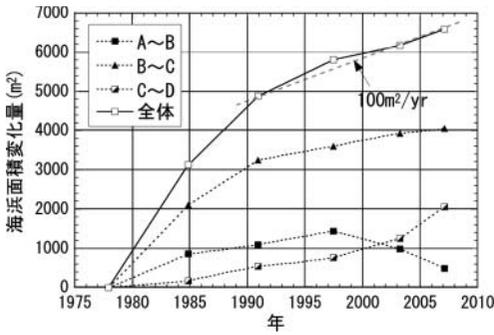


図-4 1977年を基準とした海浜面積の変化

る。また億首川河口左岸では、1977年から2007年まで砂州が発達しつつ上流方向へと遡っている。この堆積土砂は堆積状況から判断して海起源の土砂が沿岸漂砂によって運び込まれたものと考えられる。ここで、AB、BC、CD区間、および全体における海浜面積の増加量を調べたのが図-4である。海浜土砂量は時間経過とともに増大しており、1977～2007年の総海浜面積増加量は6,600m²となる。また近年の1990～2007年の増加割合は100m²/yrである。また図-4において1997～2007年でのAB、CD間における海浜面積の変化量を調べると、CD間での海浜面積の増加と、AB間の海浜面積の減少には対応関係が見られる。AB、CD間の海浜面積は1997年まではともに単調増加であったが、1997年以降非対称的な変化が起こるようになった。1984年と1997年の空中写真(図-2 (d), 2 (e))を比較すると、1984年ではAと島を結ぶ細長い砂州には水路が残されていたが、1997年では砂州は規模の大きなトンボロとしてつながり、Aを超えて西側に流入する漂砂量が減少したと推定される。このため漂砂バランスが崩れ、1997年まで明らかに堆積傾向にあったAB間が侵食傾向に変わったと考えられる。

図-4に示す海浜面積変化量に漂砂の移動高を乗ずれば海浜土砂量変化への換算が可能である。そこで次に海浜縦断測量データの分析を行った。海浜縦断形は億首川河口左岸からギンバル訓練場の東側海岸までに12測線が設定されている。これらより、図-3に示す3測線(No.4, No.6, No.7)を選び、図-5に示す。各図にはHWL(T.P.+0.97m), MSL(+0.04m), LWL(-1.13m)とともに、同時に調査した植生の種類と繁茂域を示す。No.4では、+1.5mにバームがありその陸側には植生帯が広がる。また砂移動が起こる区域の海側限界は0.0mにあり、堆積域の下限は高さ0.3mの段差でリーフの平坦面につながる。リーフの平坦面上は $d_{50}=16.2\text{mm}$ と粒径の大きな礫で覆われているのに対し、前浜は $d_{50}=0.8\text{mm}$ の砂が1/9勾配で堆積している。No.6では沖に岩盤があるためにリーフの平坦面の高さが0.4m高い。ここではバーム高は+1.4mであり、砂はバーム頂からリーフの平坦面まで鉛直方向

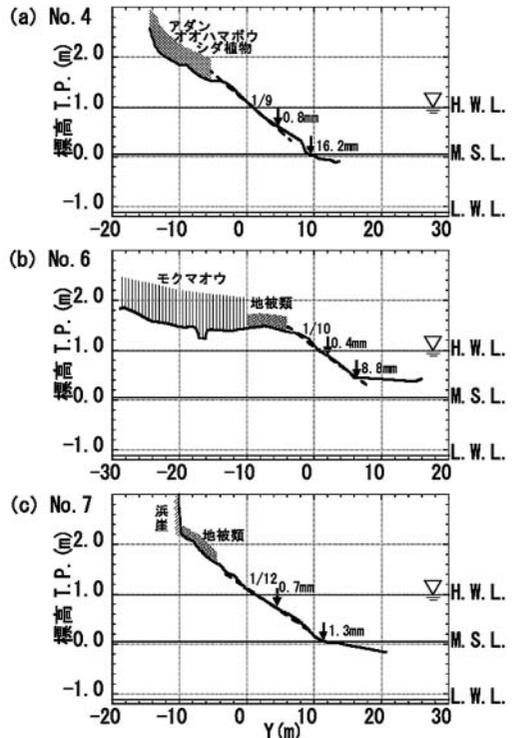


図-5 海浜縦断形と植生分布

に1.0mの範囲で移動している。前浜勾配は1/10で、前浜とリーフの平坦面に堆積している砂の d_{50} はそれぞれ0.4mmと0.8mmである。一方、過去に侵食を受けた区域を通るNo.7では、陸端(+2.2m)に浜崖が形成されており、侵食を受けたことが明らかである。浜崖基部の+2.2mから0.0mの平坦面までの鉛直方向に2.2m間が沿岸漂砂の移動空間である。また前浜勾配は1/12で、前浜とリーフの平坦面に堆積している砂の d_{50} はそれぞれ0.7mmと1.3mmである。以上より、場所的に変動はあるものの漂砂の移動高はほぼ2mと推定できる。そこで上記の海浜面積の増加割合に移動高を乗じると、1977～2007年での総堆積土砂量は $1.32 \times 10^4 \text{m}^3$ 、1990～2007年における土砂量の増加割合は200m³/yrと推定できる。

4. BGモデルによる現況再現計算

ナウファス(中城湾)の観測データによれば、この付近の海域における最多頻度の波向はEであるが、高波浪の卓越波向はSEである。そこで放物型モデルによる波浪場の計算を行ったところ、SE方向からの波は伊計島の回折によりリーフ前面ではESEとなった。このことからリーフへの入射方向をESEと設定し、方向分散法を用いて波浪場を算定した。図-6はESE方向からの波浪を与えた場合におけるリーフ上の波向と波高比の分布を示す。これによれば、海岸線に対して波が斜め入射するために、

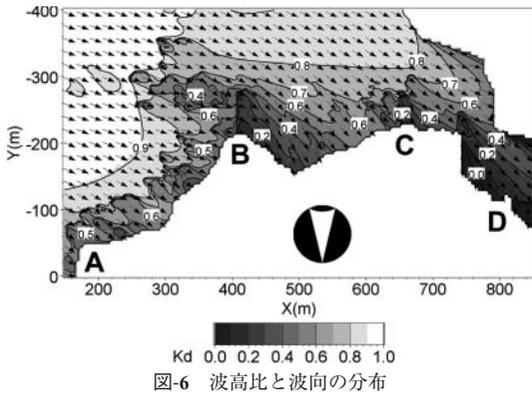


図-6 波高比と波向の分布

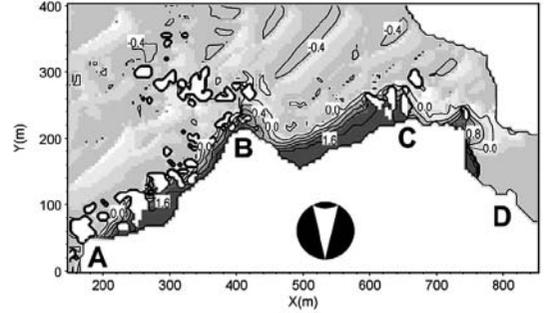
表-1 計算条件

計算モデル	BGモデル (芹沢ら, 2006) 回折計算: 方向分散法
初期地形	1997年 (島背後のトンボロ形成直後)
計算ケース	再現計算: 1997~2007年 将来予測: 10年後
入射波条件	波高 $H=0.75\text{m}$, 周期 $T=11\text{s}$, 波向 ESE, $S_{\text{max}}=10$
潮位条件	H.W.L (T.P.+1.0m)
計算空間メッシュ	$\Delta X=5\text{m}$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=100\text{hr/step}$
計算ステップ数	87.6step/yr, トータル 876step (10年相当)
粒径, 平衡勾配	前浜の中央粒径 $d_{50}=0.5\text{mm}$ (2007年実績) 代表断面の平衡勾配 $\tan\beta=1/10$
漂砂の水深方向分布	宇多・河野の分布
波による地形変化の限界水深	$h_c=1.5\text{m}$ (満潮時)
バーム高	$h_R=0.5\text{m}$
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_c=0.002$ (再現により同定) 岸沖漂砂量係数 $K_y/K_x=1.0$ (岸沖=沿岸) 小笹Brampton 係数: $K_2=1.62K_1$ ($\tan\beta=1/30$) 重力係数: 0.2 安息勾配 (土砂落ち込みの限界勾配) 陸上 1/2, 水中: 1/3
境界条件	礁原を固定床 (T.P.-0.4m) とする。 左右端: $q=0$, 岸沖端: $q=0$ サンゴ砂の供給量 固定床上に層厚 0.1m, および $X=150\sim 155\text{m}$, $Y=-100\sim -400\text{m}$ 区間からの $Q_{in}=0.5\text{m}^3/\text{m}/\text{yr}$ の湧き出し
岩礁・構造物条件	構造物および陸地の波高伝達率 $Kr=0.0$ 高い岩: T.P.+0.0m以上 $K_r=0.7$ 低い岩: T.P.+0.0m以下 $K_r=0.9$

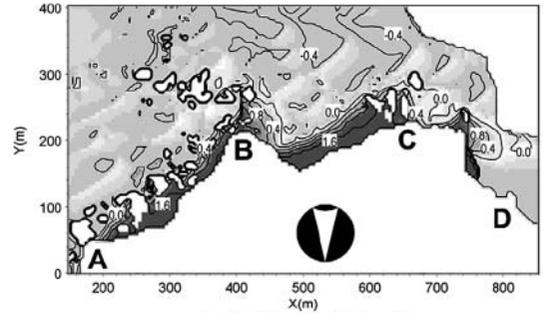
河口方面への沿岸漂砂が生じうる条件となっている。また沿岸にある岩 B, C の背後や、河口内ではかなりのエネルギー減衰が起きている。海浜変形計算ではこのようにして定められた波浪場を用いた。

海浜変形計算においては、リーフは T.P.-0.3m (砂層厚 0.1m) の平坦面とし、海浜断面は図-5 の縦断形を参照し、前浜勾配 1/10 の一様断面を想定した初期地形を与えた。リーフ面上での砂移動は、潮位の高い場合に主に起こると考えられるので、潮位は H.W.L (T.P.+1.0m) とし、満

(a) 現況再現結果



(b) 予測結果 (10年後)

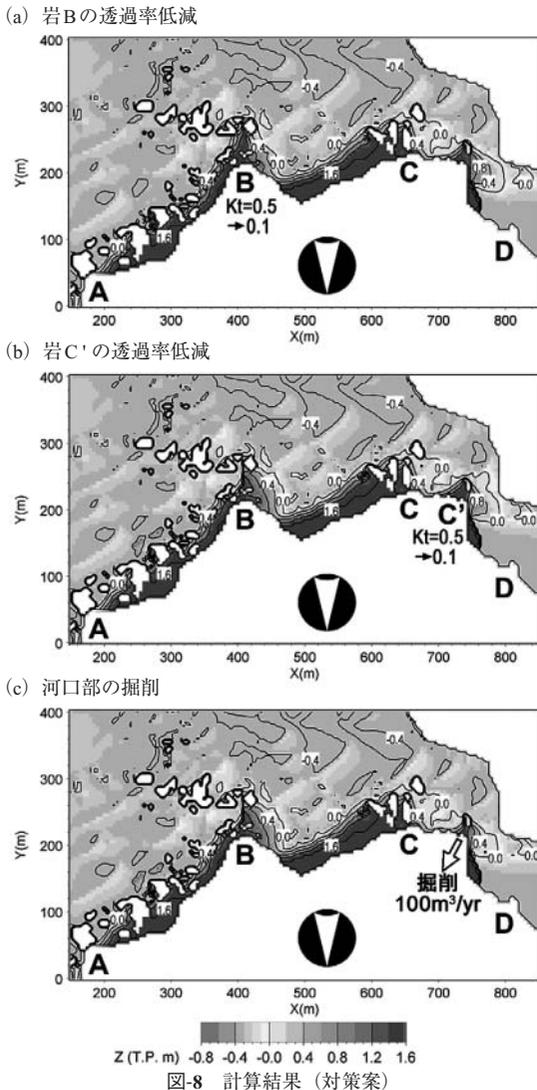


Z (T.P.m) -0.8 -0.4 -0.0 0.4 0.8 1.2 1.8

図-7 計算結果 (再現, 10年後)

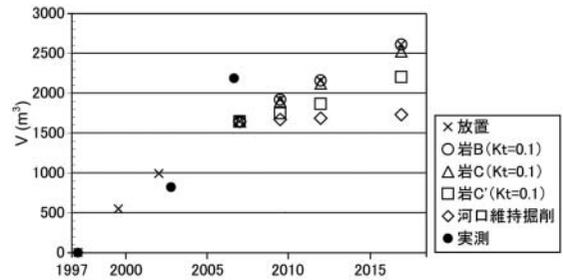
潮時の水深 1.5m (T.P.-0.5m) から T.P.+1.5m のバーム高までの範囲で地形変化が起こるとする。なお前浜勾配に対応する前浜の中央粒径は 7 測線での測定によれば平均 0.5mm である。計算条件を表-1 にまとめて示す。

上記の初期地形を与えて現況再現計算を行った。リーフ上では岸向き漂砂があるため、図-2 に示したように海浜掘削前後前浜の復元が起きたが、図-1 に示したように計算区域②の南側には航路が延びており、この溝により砂はトラップされることから、海岸への漂砂は区域②の東側面を直角に横切ると考えられる。前出の図-2 (d) によれば、岩 A, B の沖には岸方向の砂移動を示す何本もの筋目模様 (谷本ら, 1989) が観察されることから、リーフエッジに近いこの付近から対象海岸へと砂供給があったと考えられる。そこで図-7 の左境界から $0.5\text{m}^3/\text{m}/\text{yr}$ の割合で砂を供給した。また初期状態ではリーフ上に 0.1m 厚で砂の薄い層があったと仮定し、連続的な砂移動を可能とした。図-7 (a) は 1997 年の地形を与えて現況地形を計算した結果である。図-3 に示した億首川河口周辺での堆砂状況がほぼ再現されている。このことから、この状態から 10 年後の地形変化予測を行った結果が図-7 (b) である。波が海岸線に対して斜めに入射するために、東部から河口方向への沿岸漂砂が生じ、数箇所にある岩がそれらを阻害するものの、岩の隙間を通過した漂砂が河口部へと到達し、河口での堆砂が継続する。



5. 河口閉塞防止対策の検討

予測計算において河口への堆砂が予測されたことから、河口閉塞防止対策について検討した。まず漂砂上手側の岩Bの透過率を $K_t=0.5$ から0.1に下げ、砂移動を阻止した場合の予測結果を図-8 (a) 示す。無対策の場合の予測結果 (図-7 (b)) と比較すると、岩Bの東側での砂の堆積量が増加していることからそれなりの効果が出るが、河口での堆積量はあまり変わらない。同様にして、岩Bより河口に近づいた岩C'の透過率を $K_t=0.5$ から0.1に下げた場合 (図-8 (b)), 河口のすぐ隣接部で沿岸漂砂を阻止するためその分効果が高まる。しかしこれでもあまり効果は高まらない。一方、河口部への堆積量は年間 100m^3 程度であり、人工掘削が不可能な量ではない。そこで毎年 100m^3 を掘削した場合の予測結果が図-8 (c) で



ある。大量の掘削ではないが、かなり効果的なことが分かる。図-9は各案の相互比較であるが、土砂堆積の防止に最も効果的なのは河口での維持掘削であり、河口近傍の岩の透過性を下げて砂移動を阻止する手法がこれに次ぐことが分かる。

6. 結論

- 本研究によって得られた主要な結果は以下のようである。
- ① 億首川河口左岸の海岸では、戦後大規模な海浜土砂の採取が行われ海浜が消失したが、その後の波の作用で海浜が復元しつつある。海浜砂の主な供給源はリーフである。また一部が浜崖形成に伴って陸域から供給されている。
 - ② 1977年以降の海浜に堆積した土砂総量は $1.32 \times 10^4 \text{m}^3$ であり、1990～2007年の平均堆積割合は $200\text{m}^3/\text{yr}$ 、単位長さ当たりの供給量は $0.5\text{m}^3/\text{m}/\text{yr}$ と推定できる。
 - ③ 1997年頃、岬先端のAで規模の大きなトンボコが発達した結果、ギンバル訓練場の東側の海浜と本研究の対象区域は切り離され、Aを通過する沿岸漂砂が途絶えた。このため岬に近いAB間では1997年以降侵食が進み始めた。一方、億首川河口右岸には1977年までは規模の大きな右岸砂州が発達していたが、港湾防波堤が建設された結果、右岸側からの砂移動は完全に絶たれた。
 - ④ 現況で億首川の河口閉塞をもたらすのは左岸側において沿岸漂砂によって運び込まれる砂であるが、土砂堆積の防止に最も効果的なのは河口での維持掘削であり、河口近傍の岩の透過性を下げて砂移動を阻止する手法がこれに次ぐ。

参考文献

- 小林昭男・宇多高明・野志保仁・芹沢真澄 (2008) : Coral reef における砂浜発達モデル, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.1231-1236.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼 (2006) : Bagnold 概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集B, Vol.62, No.4, pp.330-347.
- 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.