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

仲座栄三*・津嘉山正光**・赤嶺好祐***・小林智尚****

1. はじめに

最近，天然のリーフによる潜堤効果が注目され，波浪による侵食の激しい海岸では人工リーフの建設が進められつつある．この工法の第一の目的は，人工リーフにより来襲波を砕波減衰させ，砂浜を暴浪より守り，従来の侵食性の海岸を堆砂性の海岸に変えることにあると思える．しかし，リーフの潜堤効果（波浪減衰効果）は別として，リーフの存在がはたして侵食性の海岸を堆砂性の海岸に変え得るか？　これに関しては疑問の余地がある．そこで，本研究では，天然のリーフ海岸上の砂浜がどのような自然の管理下にあるのかを調査し，リーフ上の堆砂特性を明らかにしようとするものである．また，Headland defence work が自然の海岸から学んだと同様に，自然のリーフ海岸に学んだ新たな人工ビーチの創造を行う．この工法は，海浜流を人工的にコントロールすると共に，波の砂輸送能力を利用したものである．また，本研究では，流体運動の縮流効果と渦対の自走能力を利用し，波による質量輸送速度を変え得る砂雲輸送ブロック（仮称）の開発をも目的としている．

2. リーフ海岸における海浜流と堆砂パターン

（1） リーフ海岸における安定な砂浜形状

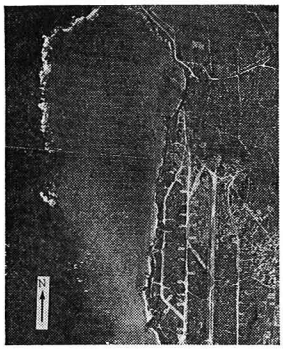
本研究では，海浜流の定性的な把握と砂浜形状とを同時に捉える方法として，縮尺 1/5000～1/20000 の航空写真を用いた．航空写真でリーフ上を調べると明瞭な流れの痕跡線が読み取れる．これは，流れによって運ばれる砂やサンゴの破片がリーフを傷つけた跡や，それらが流れに沿って堆積したものと考えられるが，このことは沖縄県漁港課（1987）や谷本（1988）らによって確認されている．

写真—1 は，沖縄本島北部の西側に位置する宇座・渡慶次海岸の航空写真である．航空 **写真—1～3** で示す海岸の位置を **図—1** に示す．写真に示す海岸の場合，幅 1000 m ものリーフが海岸に張り出している．この海岸の満潮時（H.W.L. 時）における水深は，リーフの先端付近の礁嶺（Reef crest）と呼ばれるわずかに盛り上がった所で約 1.5 m であり，礁嶺より岸側の礁地（moat: 現地ではイノーと呼ばれ造礁サンゴ及び熱帯魚の生息域である）では約 3 m である．この海岸では，リーフ上に流れの痕跡を示すと思われる筋状の線が見える．このリーフ上の筋から判断される海浜流は，岬の先端付近のリーフ先端より，岬の付け根の方に向けて，ほぼ岸に平行に流れているものと判断される．また，リーフ上の筋が極めて明瞭なことから海浜流による流速はかなり大きいものと判断される．この海岸はこれだけの規模の天然のリーフを有しているにも関わらず，砂浜は岬の付け根辺りを除いて殆ど認められない．これは，リーフ上の筋から判断される強い海浜流（沿岸流）の存在と，汀線付近における断崖の存在によるものと思われる．写真では，明瞭でないが岬の先端近くでも断崖がなくなだらかな勾配の所には安定した砂浜の形成が認められる．また，この海岸における海浜流の流れが緩やかになる下流付近のリーフ上では，白っぽく砂の堆積域が見られ，この部分にかなりの砂がまき散らされているものと考えられる．

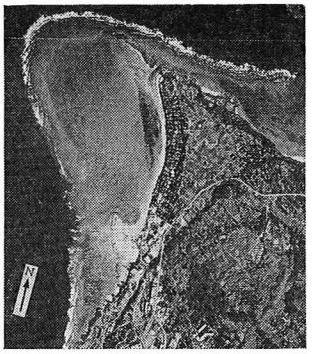
写真—2 は，先に示した **写真—1** とほぼ同様な環境下にある備瀬崎海岸の航空写真である．写真から判断されるように，この海岸でもかなりの海浜流の存在が認められる．しかしながら，この海岸一帯の汀線背後には断崖がなく緩やかな勾配の陸地が続くため，砂浜の形成が認められる．但し，その砂浜幅は約 20 m 程度であり裕福な砂浜とは言えない．**写真—3** は，瀬底島の海岸を捉えた航空写真である．写真に示すように，この海岸は幅約 250 m のリーフで取り囲まれているにも関わらず，海浜流が岸より剝離する所を除いて堆砂は認められない．**写真—4** は，干潮時におるリーフと砂浜との境目（beach front）を示している．写真に示すように，干潮時リーフが完全に干上がるような海岸では，明確な beach front が形成される．

写真—2 及び **3** で示す海岸において沿岸流の上流側から下流側に向けて採取した汀線付近の砂の粒度分布を **図—2** 及び **3** に示す．但し，砂採取の際，粒径が 3 cm

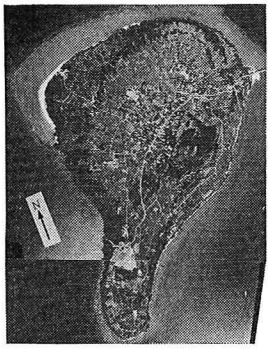
* 正員　工博　琉球大学助手　工学部土木工学科
** 正員　工博　琉球大学教授　工学部土木工学科
*** 琉球大学大学院工学研究科
**** 正員　工修　東京理科大学助手　工学部土木工学科



写真—1　宇座・渡慶次海岸



写真—2　備瀬海岸



写真—3　瀬底島・瀬底ビーチ

以上のサンゴの破片などはその場で取り除いた．図示のとおり，これらの海岸における砂の粒度分布は，沿岸流の上流部から下流部に行くにつれて（沿岸流によるふるい分け作用によって）粒径が小さくなると共に粒が揃ったものとなっていることが分かる．普通の一様斜面の海岸の場合，Silvester（1976）らによる Headland defence work で用いられているように，沖波の入射角あるいは海底勾配の変化に起因する波の屈折とが重要となる．リーフ海岸の場合，ここで示す粒度分布の場所的変化や，航空写真で例示するように，リーフ海岸における砂浜の形成には，リーフ先端付近から形成される海浜流と海岸形状とが需要な要素となっているものと判断される．

図—1　観測地点

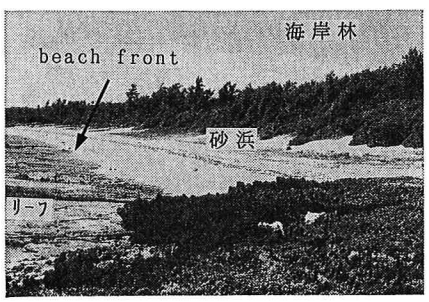
上述のような航空写真を用いた手法と現地観測による砂浜の実測値とから，“海岸地形・リーフ形状”と“波・海浜流”及び“砂浜”との組み合わせのパターンは，図—4 で示すように 4 つのパターンに大別されることが明かとなった（この判断には，沖縄県下の 300 を越える海岸を対象とした）．

タイプⅠは，沿岸流が殆ど認められず砂浜に対して波がほぼ直角に入射するような場合である．この場合，平均的な砂浜勾配は 1/10 であり，数十～数百m間隔で沖側に突き出る岩場（自然の突堤）の間に砂が堆積し，安定した砂浜を保っている．タイプⅡは，沿岸流がリーフの先端から岸方向きに鋭角の角度をもって流れ，汀線付近を迂回するようにリーフ切れ込みに流れる場合である．タイプⅢは，湾状海岸であり，湾内部に安定した砂浜を形成している．タイプⅣは，海浜流の岸からの剝離点付近に形成される比較的太った砂浜である．特に，夏場の台風による波浪と冬場の季節風による波浪とで海浜流の向きが逆になるような海岸では極めて太った砂浜が形成されている．

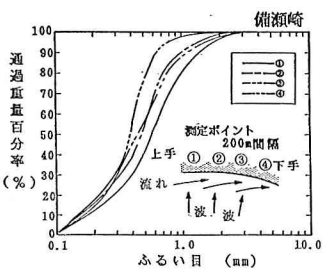
図—5 は，リーフの幅と砂浜幅との比を 図—4 のタイプ別に整理したものである．図では，リーフと砂浜とを含めた幅を 100 として表示してある．いずれのタイプにおいても，リーフの幅に対して砂浜幅は極めて小さく，リーフ海岸が強い堆砂性を有しているとは言えないことが理解される．

（2）　リーフ海岸における自然砂浜に習った新たな人工ビーチの提案

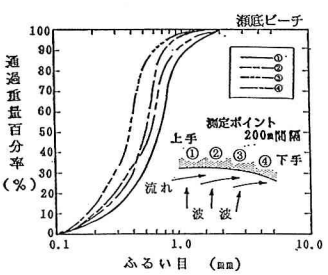
最近，侵食対策として行われつつある人工リーフは，一般的に砂浜に対して平行に配置されている．このようなリーフと砂浜との配置関係の場合，安定な砂浜を維持する為には図—4 に示すタイプⅠと同じような突堤を設置する必要があると思われる．しかしながら，突堤の建設はせっかくの人工リーフの有する景観上の有利さを打



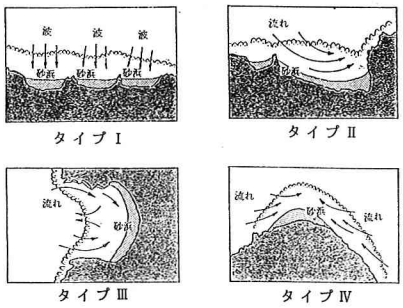
写真—4　干潮時におけるリーフと砂浜との境目（beach front）



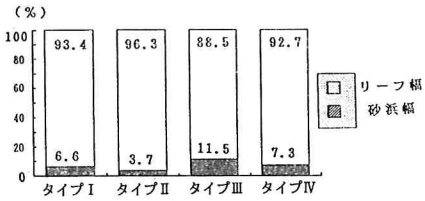
図—2　粒度分布図（備瀬崎）



図—3　粒度分布図（瀬底ビーチ）



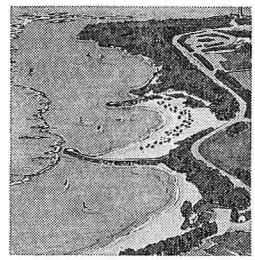
図—4　海浜流と堆砂のパターン



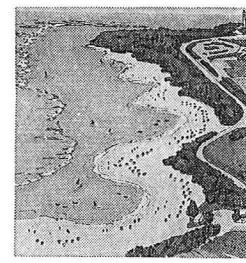
図—5　岸沖方向におけるリーフと砂浜の割合

ち消すことになる．また，直線的な海岸でタイプⅡやⅢの海岸形状を作り上げることは困難である．すなわち，リーフを有する新たな人工ビーチとしては，タイプⅣに習った形がよりよいと判断される．

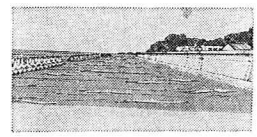
図—6 は，沖縄県下にある人工ビーチの一例である．沖縄県下にある人工ビーチの殆どが図—6 に示すような離岸堤工法と人工岬工法とを組み合わせ，人工ビーチ内の砂の移動を極力抑えるという目的から平面的にはポケット型の形状を有している．しかし，こうした人工ビーチの規模は沿岸長さにして高々数百 m 程度のものであり，そこに数日間滞在して（リゾート気分で）海水浴・海気浴などを楽しむにはあまりにも規模が小さすぎる．また，こうした小規模の人工ビーチは一般に閉鎖性のものであり，海水交換性にも欠け，一旦堆積した汚染物がなかなか浄化されなかったり，夏場水温が以上に上昇し，ぬるま湯に入っている状態になって不快感を与える場合も多い．



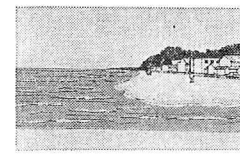
図—6　従来の人工ビーチ



図—7　新たな人工ビーチのイメージ



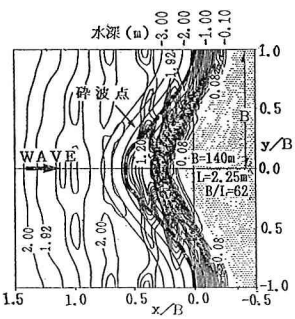
図—8　従来の護岸・離岸堤工法



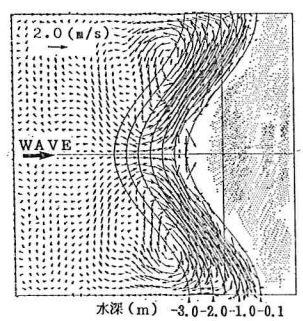
図—9　新たな護岸工法のイメージ

以上のような従来の人工ビーチが持つ欠点を改良し，さらに自然のリーフ海岸における砂浜の堆砂パターンに習った新たな人工ビーチの一例を 図—7 に示す（図—6 に示す海岸に適用した場合）．これは，沿岸方向に 波状の凹凸を作り上げるもので，沿岸流に剝離点を与えると共に，波の質量輸送効果を生かしたものである．図—8 は，護岸越波が問題となる地域で一般的に取られる離岸堤工法である．図—9 は，ここで提案する工法をこうした海岸に適用した場合である．この場合，新たに設けた人工ビーチの凸部で波の集中が危惧される．図—10 は，この人工ビーチの凹凸を正弦的に変化させた場合を想定し，沖波波高を 2m，周期を12秒として数値計算により求めた人工ビーチ周りの波高分布を示している．なお，数値計算には渡辺・丸山ら（1984）の計算モデルを用いた．図示のとおり，ビーチの凸部では若干波の集中が見られるもののその分砕波が比較的深い所（沖側）で発生し，汀線付近ではかなり波高が小さくなっている．

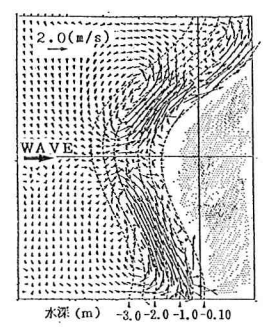
図—11 は，図—10 で示す人工ビーチ周りの海浜流の流速ベクトルを示している．図示のとおり，海浜流は人



図—10　波高分布図（数値計算結果）



図—11　流速ベクトル図



図—12　流速ベクトル図

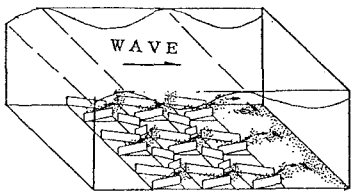
工ビーチの凹部で大規模な循環流を形成しており，この場合，比較的大粒径の砂はビーチの凸部に残り，凹部では粒径の細かい砂が堆積するものと考えられる．

図—12 は，海岸法線に対して 15° の角度で波が入射して来る場合の海浜流の数値計算値を示している．もし，海岸が平行等深線海岸である場合は沿岸方向に Longuet-Higging (1970) が理論的に与えた沿岸流分布が存在するはずであるが，ここで提案する人工ビーチの設置によりこの流れに抵抗するような流れも作りだされ，沿岸流をうまい具合にコントロールできるものと考えられる．

3. 波の質量輸送速度を制御し得るブロック開発の試み

汀線付近では来襲波の条件によって，岸沖漂砂あるいは沿岸漂砂が生じる．砕波点より沖側の砂れん形成領域では，砂れん頂部よりの剝離渦により砂雲が発生し，砕波帯内では砕波による強い乱れによって砂の浮遊が形成される．こうした砂雲・浮遊砂は，海浜流及び波による質量輸送によって運ばれるものと考えられる．Longuet-Higgins (1953) が与えた波の質量輸送速度によると，海底面付近では岸方向の質量輸送速度が存在し，水深の中間点付近では沖向きの質量輸送速度が存在することが指摘されている．しかしながら，これは底面付近の境界層が層流境界層との仮定の下に導かれたものであり，強い非線形性波や海底面に大粗度が存在する場合は，Longuet-Higgins (1953) が与えた理論解とかなり異なることが考えられる（例えば：沢本ら，池田ら，滝川ら，1989）．

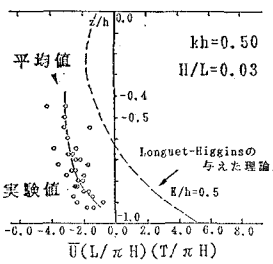
本研究で提案する人工ビーチの場合，比較的弱い海浜流が形成されるならば，来襲波は屈折効果により殆ど汀線に直角に入射することになる．こうして来襲する波が強い岸向きの質量輸送能力を有しているならば，ここで提案する人工ビーチは比較的安定した砂浜を維持するはずである．筆者らは，リーフ上に堆積する赤土を外洋に移流させる為の工法を開発中である．その中で，波に任意の方向に質量輸送を持たせ得るブロックの開発をも進めている．その一つの試作が，図—13 に示す砂雲輸送ブロック（仮称）である．このブロックは，波動運動する流体の縮流効果や渦対の持つ自走能力及び質量輸送能力を利用したものである．



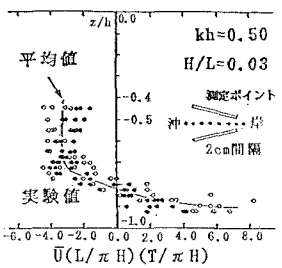
図—13　砂雲輸送ブロック（仮称）のモデル図

現在開発中のブロックを水平床上に設置した場合と設置しない場合とにおける波の質量輸送速度（Euler 流速の一周期平均流速）を実験的に求めたものを図—14～16 に示した．流速の測定には電磁流速計を用い，50 Hz のサンプリングインターバルで測定した．図—14 は，ブロックを設置しない場合の平均流速の鉛直分布を示している．図中，実線は実験値の平均値を示しており，破線は Longuet-Higgins (1953) の与えた理論解を示している．図示のとおり，Euler 流速の平均値である実験値は，海底の極めて薄い層を除いて沖向き流速である．実験値が破線で示す理論値と大きく異なるのは，勿論，理論値が Lagrange 流速であるのに対し，実験値が Euler 流速であることに基づくと考えられる．しかし，一方で海底面付近は鉛直流速が小さく両者の差は余り生じないと考えられ，これ程の差が生じたのは Longuet-Higgins (1953) の理論解に含まれる仮定（層流境界層付近）や収束性アーセル数が大きい領域において問題となることも考えられる（例えば，宗方・松永ら，1990）．

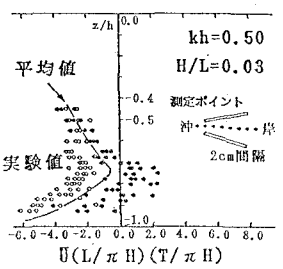
図—15 は，ブロックを設置した場合の平均流速の鉛直分布を示している．図示のとおり，底面付近では岸向きの大きな平均流速が形成されている．一方，図—16 は図—15 に示す場合と逆方向にブロックを設置した場合で，この場合底面付近では沖向きの平均流速が発生している．この実験では，平均粒径 1.0 mm，比重 1.03 の粒子を用いて粒子の移動をも調べたが，図—15 に示



図—14　平均流速の鉛直分布図（ブロック無し）



図—15　平均流速の鉛直分布図



図—16　平均流速の鉛直分布図

すブロック配置では粒子の殆どが岸向きに移動し，図—16 に示すブロック配置の場合は沖向きに移動した．なお，ブロックを設置しない場合，粒子は沖向きに輸送された．ここで，砂村（1982）の用いた軌道流速強度を与える無次元パラメター Ψ' は 3000 となり，砂村の漂砂方向を与える図表から外挿すると粒子は沖側へ移動する範囲にあたる．

以上より，ここで示したブロックにより波の質量輸送速度をコントロールし得ることが明かとなった．しかし，より厳密には Lagrange 流速による一周期平均流速が砂粒子の移動に関係してくるため，今後この点の検討が必要と考える．また，造礁サンゴ（波に対して大粗度となる）の生息する海域では，比較的太った砂浜が形成されている場合が多い，これは砂の供給源であるサンゴの存在によるものと考えられるが，他方でサンゴ（あるいは，人工的な海底大粗度）の存在が波の質量輸送速度を変化させているとも十分考えられる．これに関しては，図—14～15 に示した結果と併せて現在検討中であり，別の機会に紹介したい．

4. おわりに

現在，侵食性の海岸や護岸越波が深刻な問題となっている海岸で人工リーフの建設が景観上の理由から好んで建設されるようになってきた．リーフの有する波浪減衰効果は別として，こうした人工リーフの建設が侵食性の海岸をはたして堆砂性の海岸に変え得るか？ 本研究では，自然の人工リーフの堆砂特性を調べることにより，この問題に対する答を引き出すことを試みた．その結果，リーフ海岸では海浜流と海岸形状とによって堆砂特性が異なり，その堆砂パターンは4つのパターンに大別されることを示した．また，沖縄県下の 300 余の海岸からリーフ幅と砂浜幅との比較を行い，リーフ幅に比較して砂浜幅が圧倒的に小さいことを示した．こうした結果から，自然のリーフ海岸の堆緋特性に学んだ（平面的に開放的で長大な）人工ビーチの創造を行った．さらに，波の質量輸送速度をコントロールし得るブロックの試案を提示した．

参考文献

沖縄県農林水産部漁港課 (1976)：珊瑚礁内波浪観測調査報告書，p. 85.

砂村継夫 (1982)：浅海域の岸沖漂砂に関する実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 239-243.

宗方鉄生・松永信博・櫓田 操・小松利光 (1990)：三次元規則波によって砕波帯外で生じる定常循環流，土木学会西部支部研究発表会，pp. 166-167.

谷本修志・中野泰雄・大月和義・宇多高明・小俣 篤 (1988)：沖縄県仲泊地区のリーフ周辺での波と流れの観測，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 207-211.

渡辺 晃・丸山安樹 (1984)：屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値解析法，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 103-107.

Longuet-Higgins, M. S. (1953): Mass transport in water waves, Phil. Trans. Roy. Soc., London, Series A, No. 903, Vol. 245, pp. 481-504.

Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1, 2, J. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 6778-6801.

Silvester, R. (1976): Headland defence of coasts, Proc. 15th ICCE, ASCE, pp. 1394-1406.