

海岸保全工としての人工養浜の特性評価の試み

—— アメリカ合衆国における養浜事例からの考察 ——

AN EVALUATION OF BEACH NOURISHMENT AS SHORE PROTECTION DEVICE BASED ON PRACTICAL EXAMPLES

堀田新太郎¹, 久保田進², 針貝聰一³

Shintaro Hotta, Susumu Kubota and Souich Harikai

¹正会員 工博 日本大学教授 国際関係学部国際交流学科 (〒411-8555 三島市文教町 2-31-145)

²正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14)

³正会員 ㈱コストアル エンジニアリング (〒162-0815 新宿区筑土八幡町 2-21)

A review to place the physical assessments of beach nourishment projects of USA in perspective by placing them in the broader context of long-term commitments to coastal resources is carried out. Attention is focused on the scale of nourishment operations, sources of fill materials, economic costs of projects, sources of sediments, design considerations, locations for fill, negative and positive ecological impacts of nourishment, and enhancement of dunes. Results are briefly summarized and their adaptability for Japanese coasts is discussed.

Key Word : *Erosion control, shore protection, beach, artificial nourishment, replenishment*

1. はじめに

海岸侵食対策の一工法として人工養浜工がある(以後、簡略に養浜と呼ぶことにする)。養浜は建物やその他の社会基盤施設を海岸侵食から防御するため恒久的な海岸構造物構築までの応急的簡便な代替工法として使用され始めた工法である。しかし、現在アメリカ合衆国やオランダでは養浜は侵食対策工として一般的に採用される工法であり、ヨーロッパ一諸国でも採用されることが多くなっている。¹⁾

日本では人工海浜造成のための小規模な養浜の施工例は有るが、海岸侵食対策として養浜がなされた例は限られている。日本において海岸侵食対策として養浜施工例がかぎられている理由として、i) 行政・経済上の制約、ii) 養浜砂の確保が困難な事、iii) 沖合の浚渫砂を養浜砂の供給源とするとき浚渫場所の生物環境変化が不明なこと、等と云われている。現在の日本の海岸侵食及び対策の状況を見ると、直感的な私見であるが、侵食対策の選択肢として養浜が適切であると考えられる侵食海岸がある。その例は、

i) 遠浅の海岸で、侵食が進み海浜幅が減少し、砂浜の利用に支障を来しつつある海岸、
ii) 前砂丘が侵食され始めている海岸、
iii) ある海岸域で、漂砂の上流側で侵食が進行し、漂砂の下流側で堆積が生じている海岸でのバックパス (back pass)、などである。

近年の日本の海岸侵食対策への考え方は、線防

御法から面的防御法に変わりつつある。面的防御法において、養浜は親水性、砂浜の生物環境保全に有効である、との認識から重要な構成要素と考えられるようになってきている。一方、人工海浜の造成などに見られるように養浜により造成される新海浜の利用が着目されている。日本において、今後養浜の施工例が増加することが予想できる。

日本の海岸工学の水準は高い。砂浜海浜変形に関する工学的な研究への日本の技術者、研究者の貢献は高い。合衆国の養浜についての工学的観点に関する情報は日本では十分に周知されている。しかし、日本では侵食対策としての施工事例が少ないことから、工学的観点以外の情報については理解が不足している。この研究の目的は、工学的技術的事項以外の合衆国の養浜施工事例の情報を整理し、その結果に基づいて日本における養浜施工の適切性を評価しようとの試みである。

2. 施工事例から見た養浜の特性

(1) 侵食対策以外の目的で養浜が成された事例

侵食対策を主目的としない次のような養浜施工の事例がある。

- i) 新しい砂浜海岸の造成²⁾
- ii) 海岸環境の改善³⁾
- iii) レクリエーション海岸の美観改善⁴⁾
- iv) 平均海面上昇対策⁵⁾
- v) 既存海岸構造物によって生じる悪影響の減少⁴⁾

- vi) 既存護岸 (Seawalls) の防護⁶⁾
- vii) 砂丘内側防護のための砂丘強化⁷⁾

これらの事例は結果的には侵食対策の効果が発生している。観点を変えると養浜は侵食対策に加えて、他の付加価値が生じると考えられる。

(2) 養浜の規模

合衆国において、養浜は 1950 年代から一般的に施工されるようになった⁸⁾。1970 年代からは、海岸防御に使用される連邦政府の予算の約 90% は養浜事業である⁹⁾。1999 年の時点で、少なくとも 382 海岸で 1305 事業が実施された¹⁰⁾。1950-1993 年の間に連邦政府による大規模な 56 養浜事業が実施され、防御された延長は 364 km であった。延長 28,600 km の海岸線が侵食されており、連邦政府管理下で危機的な状況まで侵食が進み緊急に防御を必要とする海岸線延長は 3439 km である¹¹⁾。養浜によって防御されている海岸線の延長は自然海岸の総延長に比べると相対的に少ない。1950-1993 年の間に工兵隊によって施工された 56 事業で投棄された土砂量は 14400 万 m^3 であった⁹⁾。一事業あたりの平均は、約 250 万 m^3 になる。養浜によって拡張された巾は約 30m~120m であった⁴⁾。養浜は防御する海岸線は短い割に必要な土砂量は多い。養浜砂の単価は多くの要因に依存するが、約 \$ 30/ m^3 までに達した例がある¹²⁾。

(3) 養浜砂の運搬

通常には養浜砂の浚渫、パイプラインによる海水と養浜砂のスラリー輸送が採用されている。小規模な局地的な養浜事業あるいは大きな問題の解決までの緊急仮設の養浜事業も多くは土砂運搬にトラックを利用している。トラックで運搬される土砂量は 2.3 万 m^3 ~4.56 万 m^3 程度であるが、68 万 m^3 、100 万 m^3 と云う例もある。^{2), 13), 14)}

(4) 養浜砂供給源

養浜砂の供給源は外洋、河口、湾奥、内陸であるが、一時的な港湾、マリーナ、潟の浚渫した砂、建設現場などから供給される土砂であることもある。現在アメリカ合衆国で使用される養浜砂の 95% は沖合の採集区域から取得されている⁷⁾。養浜砂は供給源によって粒度特性は異なる。養浜海岸に適合する粒度特性を持つ砂を用いることは、養浜の安定性と事業の効果を高めることになるが¹⁵⁾、実際に使用される養浜砂は経済的な理由によって定まることが多い。航路維持のために浚渫される砂量は多い。しかし、管理上の制限からその付近の海岸の養浜砂として使用できないことがある。浚渫される航路は必ずしも養浜を必要としている海岸近くに位置していない。航路から浚渫した土砂を養浜砂として利用できる海岸が近くにあっても、天候と養浜時期との

時間差によって経費がかさみ、浚渫した土砂を他の場所に投棄する方が経済的ある場合もある。しかし、現今では、養浜砂の確保が難しくなりつつあるので行政官庁は浚渫土砂が汚染されていない限り、たとえ少量であっても養浜砂として使用するよう計画し、使用することを奨励している¹⁶⁾。

養浜計画における大きな不安定要素の一つは、養浜計画の期間 (連邦政府の計画では 50 年) の養浜砂の確保である⁷⁾。従って養浜砂の供給可能なすべての供給源を利用し、供給可能な供給源の探索を積極的に行う必要性が指摘されている。いくつかの州では長時間の養浜砂を確保するために供給源の開拓を積極的に開始している。広大な国土を持つ合衆国でも養浜砂の 95% を沖合の採集区域から取得しており、かつ養浜砂の確保が困難になりつつある。日本では内陸から養浜砂を確保することは現時点では期待できない。ダムに堆砂している土砂の養浜砂としての利用が期待できるが、未だ社会的通念として受け入れられていないし、技術的にも研究の余地が多い。日本での養浜の可否は沖合からの養浜砂の確保の可否に依存することになる。

3. 養浜の経済性

養浜が他の耐久的構造物より侵食対策として経済的に適切な工法であると判断するには、次のような条件が成立すれば良いことになる。

$$E > SE \times N$$

ここに、E: 耐久性海岸構造物建設費用、SE: 一回の養浜に必要な費用、N: 養浜回数、BNL: 耐久性海岸構造物の償却期間 (耐用年数、合衆国では 50 年)、Y: 再養浜が必要となる期間、N: 養浜回数 = BNL/Y である。Y が求まれば養浜の有用性を決めることが出来る。実際の施工例では、大規模な養浜では 3~4 年¹⁶⁾、中規模養浜では 7 年以上¹⁷⁾ である。Y の値によって結果が異なることになる。実際の計画では Y は計算モデルの予測によって決める。実際の養浜計画においては、養浜の経済性は「費用一便益法」によって評価されている。養浜の経済性 (費用一便益効果) については多くの議論がある¹⁶⁾。計画に対して費用効果のよい評価から過度に悪い評価¹⁸⁾まで幅広い評価がある。養浜の経済性を評価することは難しい。上述の経済性の評価手法 (費用一便益法) の多くは、養浜による自然環境改善、観光価値の上昇、養浜が他の問題へ与える利益、不利益は評価されていない¹⁹⁾。環境改善、観光価値の増加について意味ある量的指標がなくても、養浜は長い km 規模の耐久構造物より確実に好まれるのは事実である。工学的観点からのみでなく養浜の付加価値をも考慮すべきである。養浜の管理維持のための経常経費の支出は財政上嫌われる傾向があるが、耐久構造物建設費用と耐久構造物耐用年数間の養浜維持費が平衡するなら、養浜砂採集、輸送と投棄に必要な

経費の支出はその地域に経常的な経済効果を生じるとの観点にたてば養浜は侵食対策の選択肢として適切な選択となる。

4. 養浜の計画と施工上の問題

養浜の計画は図-1に見られるように、計画断面 (design cross-section) と施工断面 (advanced-fill cross-section) を定めることにある⁷⁾。計画断面は海浜を安定に維持するために必要な最終断面形状であり、施工断面はある一定期間の侵食量を予測して付加的に養浜する断面である。しかしながら、これ等の断面を定めることは難しい。合衆国における現今の計画では、断面の決定は経験に基づいた GENESIS, BEACH と呼ばれている数値計算モデルを使用しているが、必ずしも良い結果を与えていない。断面決定に関する数値モデルの検証は Thielert et al.²⁰⁾によってなされている。数値モデルが良い結果を与えない理由は1) モデルを支配する要因が単純化され過ぎている、2) モデルにおける重要要因である波浪条件の予測が的確でない、とされている。数値モデルの精度を上げるためには波浪条件と侵食量との関係についての現地データの蓄積が必要であると指摘されている。数値モデルについては日本の技術水準は十分に対応できる。しかし、養浜に関する波浪条件と侵食量との関係についての現地データの蓄積は乏しい。アメリカ合衆国での一般的な養浜計画断面は、図-1に示されるような形状で、養浜砂は汀線近傍に投棄される。断面の特徴は、現地断面を基本とする単純な断面、平坦な必要海浜幅、後浜より僅かに高い養浜砂面標高、海側勾配は漂砂帯縁端水深 (closure depth) まで現地の平均前浜勾配 (必要な時は複合勾配) などである。海浜幅については

常時必要幅が確保されるわけではない。多くの場合経費との妥協で定まる。高い養浜砂面標高は波浪に対する抵抗を増す。Dead Neck Beach, Massachusetts 州で後浜標高より 1.8m 高い養浜砂面標高が用いられた事例がある²¹⁾。通常計画海浜断面は必要断面 (海浜利用に必要な幅と侵食対策の面から) と経費を勘案して定められることが多いが、養浜海岸が浚渫土砂の捨場あるいは漂砂の下流側への漂砂源として養浜される場合は意図的に大きな断面が採用されることが有る²²⁾。施工断面と計画断面について施工上の問題が指摘されている⁷⁾。施工断面が形成された直後に高波浪時があり、施工断面陸上部大きくが侵食され断面形状が変化した時、“養浜計画は失敗した”との印象を人々に与える。例えば、フロリダ州、Indianlantic/Melbourne Beach で施工断面完成後 2 ヶ月の間に陸上部の約 56% の養浜砂が侵食された²³⁾。目に付き易い陸上部の養浜の速やかな流失はしばしば養浜計画は失敗であるとの非難を受けている。しかし、必ずしもこの非難が的を得ているとは云えない。多くの場合、陸上部から流失した養浜砂は外浜に堆積して、波浪エネルギーの消散の役割を果たしている¹⁶⁾。一方、養浜砂が計画断面の沖合まで流失し、波浪エネルギーの消散の役割を果たしていない場合もある²⁴⁾。養浜計画の成功、失敗は陸上部からの養浜砂の流失割合から判断出来ない。

上述のような外的な非難を避けるために、養浜計画を断面形状で表現するより必要養浜砂量で示した方が良いとの提案がある²⁵⁾。養浜計画を砂量で示すことにすれば、陸上部断面の形成を急ぐ必要がなく、従って必要養浜砂の確保、施工業者の選択範囲が広がる。

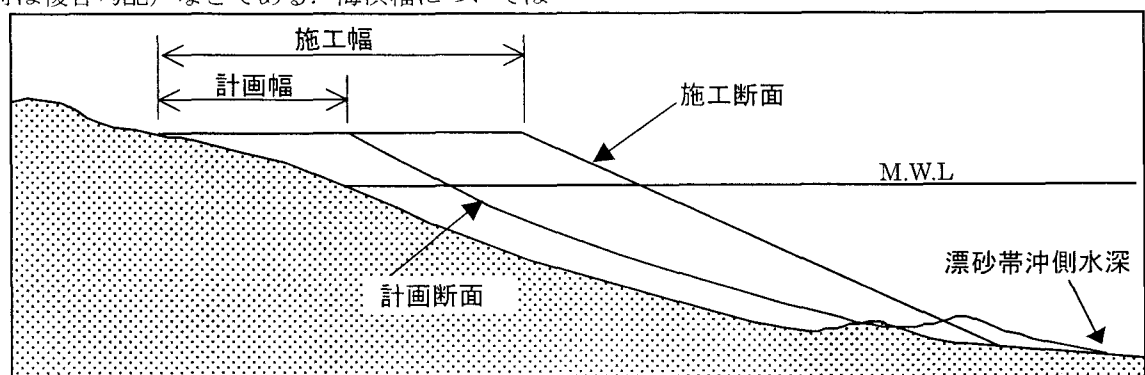


図-1 養浜計画断面と施工断面

5. 養浜砂投棄地点

図-2はアメリカ合衆国およびヨーロッパ諸国で施工された養浜事例の養浜砂投棄地点 (領域) を示した概念図である (Nordstrom⁴⁾ 一部補正)。投棄地点を示す「術語」は著者等によるもので、一般的に使用されている訳語ではない。海浜陸上部 (Upper beach) は平均海面から陸側 (後浜と前浜の一部)、Nearshore 帯は平均海面から海側の前浜部と一般的

名称の Nearshore 帯を含む範囲、浅海海底土盛 (Active berm) は砕波点の沖側で漂砂移動のある領域に養浜砂を投棄して形成したマウンドを意味する。

(1) 海浜陸上部への投棄

養浜砂は4 (4) に記したような養浜断面の場合が多いから、養浜砂は後浜から漂砂帯沖側水深 (Closure depth) までの範囲に投棄されることが多

い。しかし、緊急時には海浜陸上のみに投棄されることもある。海浜陸上部のみへの投棄は必要養浜砂量が正確に予測できる利点がある。養浜された海浜部は投棄終了後直ちに波の篩い分け作用を受ける。波の遡上の無い所では風に抛る篩い分け作用を受ける。断面の粒度組成分布は元の海浜と異なることになり、養浜海岸の生物環境に影響を及ぼす。経費の面から必要な養浜砂量が得られない時、望ましい厚さより薄く養浜砂が海浜部に敷かれることがある。これは時には化粧（表層）養浜と呼ばれている。ビーチブ

ロファイルの荒天時変動・季節変動及び侵食量が解っていて、計画断面が的確に予測可能な海岸には適切な養浜法である。このような場合には汀線近傍のみに養浜されることが多い。事例は Key West, Florida, と Corpus Christi Bay, Texas にある²⁶⁾。前者に珊瑚屑、後者は粒径の小さい砂を下層に敷き、養浜砂で上層を覆っている。地形学的には湾内の低エネルギー海岸に適切な方法である。外洋に面した高エネルギー海岸での化粧養浜の事例は無い。

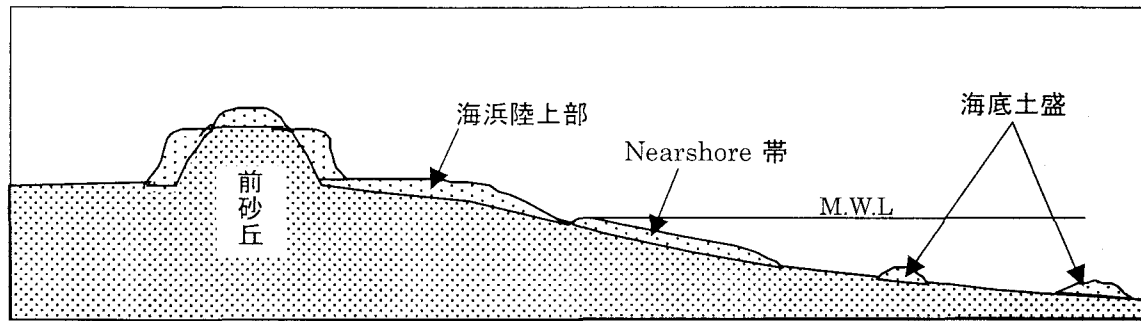


図-2 養浜砂投棄地点を表す概念図

（2）Nearshore 帯への投棄

通常に用いられる養浜形状（汀線近傍の海浜、海中に養浜砂を投棄する形状）では養浜後陸上部の養浜砂は波の作用を受け沖側に移動し、Nearshore 帯に留まり、侵食を防止する。Nearshore 帯に養浜砂を投棄するのは、陸上部から波の作用で移動してきた砂が留まる Nearshore 帯に直接養浜砂を投棄し、侵食を防止する、と考えるからである²⁷⁾。しかし、侵食防止効果についての評価は難しい。この養浜砂投棄形式の調査研究は無く、計画指針は未だ確立されていない。Nearshore 帯への養浜砂投棄には、i) 海浜陸上部の投棄に比べて経費が小さい、ii) 養浜による海浜景観の変化が目立たない、iii) 断面形状を形成し易い、等の利点があり、使用されることが多くなっている。しかし、養浜後の陸上部への堆積は遅く養浜計画断面を形成するまでに長時間を要するので、養浜計画は成功していないと見られることがある。Nearshore 帯への養浜砂の投棄は海水と砂のスラリーとして放出するケースが多いが、養浜砂を底の平らな浅海用台船で運搬し、海中に投棄する場合もある。

（3）浅海海底土盛

海底土盛（Berm あるいは Mound が使用されているがここでは“土盛”の訳語を使用する。）は浚渫土砂を海底に放置し凸状のマウンドを形成したものである。通常ホッパー台船が使用される。海底土盛は i) 海底生物・魚類の育成、ii) 沖合への土砂流失阻止、iii) 波の減衰、iv) Nearshore 帯への漂砂供給源、v) 後ほど実施する養浜のための一時的な貯蔵、などを意図して形成される。目的によって設置水深

を変えることになる。浅海海底土盛は ii), iii), iv) 項の効果が有ることを示している幾つかの現地調査が有る³⁸⁾。浅海海底土盛の適切な位置については妥当な指針は未だ無い。

（4）砂丘近傍への投棄（砂丘防護のための養浜）

図-2 に養浜砂投棄地点として、砂丘前面、砂丘頂部、砂丘背後を示して有る。砂丘への養浜は合衆国、オランダに事例がある。合衆国の場合の砂丘は自然に形成された前砂丘である。オランダの場合は自然に形成された前砂丘もあるが、砂丘が無かった海岸に人工的に盛土して形成した砂丘への養浜が多い。つまり砂丘の維持のための養浜である。オランダの砂丘への養浜砂は通常汀線から 10km 以上の沖合、水深 20m 以上の海域から浚渫している。浚渫された砂は粗砂で大量の貝殻屑を含むことが多い²⁹⁾。砂丘への養浜の目的は荒天時の遡上波の防御、高潮対策である。これ等の事例は今考慮している侵食防止を直接の目的とした養浜ではない。従って、前砂丘の侵食防止のための養浜と事情が異なる。日本の前砂丘は、明治末期からの海岸砂防事業によって形成されたもので、堆砂垣を繰返し設置し自然の力を利用して形成した砂丘である。その前砂丘が今侵食の危機に晒されている。前砂丘を漂砂の供給源としてそのまま放置して良い、と考えるなら侵食対策を施す必要は無い。しかし、前砂丘を背後の保全を図るために人工的に構築した構造物と考え保持する必要があるなら、前砂丘の侵食対策が必要である。その侵食対策として、著者等は前砂丘前面への養浜が適切であると考えているのである。その理由は、養浜による海浜の造成は飛砂によって前砂丘の保持が図ら

れ、侵食対策に加えて高波、高潮、津波への防御が期待されるからである。

6. バックパス

バックパスは堆積を続けている海岸の土砂を採集し、侵食している海岸へその土砂を投棄して侵食を防止する工法である。バックパスは局所的に激しい侵食を生じている場所、小規模な養浜、養浜の維持に適しているので小規模な事例は多い³⁰⁾。多くの場合地方自治体の事業として成されている。New Jersey, Avalon 市は、市自体の予算で市独自の判断で、局所的な侵食海岸の回復、砂丘補修、養浜の維持についての事業を実施する許可を New Jersey 州政府から得て、バックパス事業を展開している。養浜砂は市内の堆積海岸、あるいは重要度の低い海岸から得ている。1 日約 30 台のトラックが稼働し、1 年間に 38,000m³ の土砂を運搬、単価は \$ 0.75/m³ の事例がある³¹⁾。バックパスは工事の手軽さから緊急事態に対応できる。South Carolina 州、Pawleys Island の中央部海岸が、ハリケーン Hugo によって甚大な被害を被ったとき、緊急対策としてバイパスと併用してバックパスが用いられた事例がある³²⁾。

バイパッシングは突堤などに捕捉され滞留している土砂を漂砂の下流側に移動する工法であるが、バックパスは漂砂の上流側に移動する。バックパスは砂のリサイクル使用である。漂砂の循環を補正すると言う意味で適切な方法である。元の海岸にも好都合であり、かつ新しい養浜砂採集区域を用意する必要性を減ずる。現在のところバックパスはバイパッシングに比べて施工事例数は少ない。しかし、養浜砂の確保がより困難な状況に成りつつあるので、将来バックパスの施工が増加すると考えられる。大規模なバックパスには長大なパイプライン、ポンプステーションの建設が必要であり、初期においてはかなりの投資が必要である。しかし、初期投資の後の経常運転経費は安価である。ある範囲の海岸を総合的に考え、海岸域全体の安定を図ることを意図する時、100km 程度の領域においてもバックパスの適用は良い選択と考えられる。

7. 沖浜養浜砂採取区域

浚渫によって養浜砂採取区域の海底地形は変化する。砂採取区域の海底地形の変化は次のような事態が生じる。i) 漂砂のトラップとして作用し局地的な土砂収支を乱す、ii) 波浪状態を変え近隣の海岸に局地的な侵食、堆積を発生させる。iii) 水深の増加、局地的な水の循環と温度分布の変化、海底表面の土砂特性の変化は生物への局地的な環境変化の原因となる。日本では、生物の環境変化についての現地データの蓄積は乏しい。

8. 生物環境への影響

侵食防止や砂浜回復を目的とする養浜は生態系へ圧迫を与える。養浜とその後の生態系の変化については明確でない曖昧な記述の文献は多数あるが正確なデータに基づいた文献は限られている⁴⁵⁾。この項については本論文集「人工養浜に伴う海岸生物環境の変化とその問題点に関する調査研究」を参照されたい。

養浜作業に拠って、i) 採取区域と養浜海岸における水質汚濁、ii) 投棄時の海水飛散による空中塩分増加による海岸陸地の塩分増加、iii) 浚渫の結果生じる海底地形変化と波浪条件の変化、iv) 養浜海岸の粒度特性変化等、が生じる。その結果、生態系に i) 採取区域の生物損傷、ii) 養浜海岸の生物の埋没、iii) 養浜海岸で繁殖する種への妨害、iv) 採取区域の種の養浜海岸への強制移動と望ましく無い種の異常増殖、v) 採取区域と養浜海岸の条件変化による種の生態系構造の変化および進化過程の混乱、等の問題が生じている⁷⁾。養浜は生物に悪影響を与えるばかりではない。適正な養浜事業は生態系の保護、回復する。しかし、養浜による生態系の損失を最少に、利益を最大を図るためにはかなりの経費増額を必要とする。養浜は生物に有効な面があることは事実であるが、養浜の生物への悪影響と好影響を量的に評価することは未だ不可能である。生物に関する問題は多いが、侵食防止とレクリエーション利用が、経済的になされている限りには、生物に関する問題によって養浜事業が中断されることがないというのが実情である。

9. 終わりに

以上は事例から得られる多量の情報の中での限られた情報の概略である。日本において養浜を計画する際の一般的な利点と不利な点は次のようになる。

【養浜計画に不利な点】

- i) 養浜事例が少なく養浜に関する波浪条件と侵食量との関係現地データの蓄積が乏しい。
- ii) 養浜事例が少なく生物の環境変化（損傷と回復）についての現地データの蓄積が乏しい。
- iii) 養浜砂の確保が問題で養浜の可否は沖合からの養浜砂の確保の可否に依存する。
- iv) 信頼できる費用便益法が確立していないので養浜の効果が量的に評価出来ない。

【行政当局者、住民の理解に依存する事項】

- i) 養浜は防御する海岸線は短い割に必要とする土砂量は多い。
- ii) 高波浪による施工途中の断面急変
- iii) 養浜の管理維持（養浜砂採集、輸送、投棄）に必要な経常経費の支出。

【利点】

- i) 日本の高度の海岸工学技術水準
- ii) 侵食対策としての養浜による砂浜造成は侵食対

策以外の付加価値が生じる。

- iii) 砂浜はコンクリート構造物より住民に好まれる。
- iv) 初期投資額は他の耐久構造物より少ない。
- iv) 経常経費支出の理解が得られるなら、養浜は経常的な経済効果を生じる。

著者等が侵食対策の選択肢として養浜が適切であると考へた侵食海岸についてみれば、

i) 侵食が進行している遠浅の海岸

このような海岸では通常多段のバーが存在する。沖側に有るバーを5(3)海底土盛で述べたv)の養浜砂の貯蔵庫と想定して養浜をすれば養浜砂の確保が出来好都合である。砂浜が拡張できれば、前砂丘の保全にも効果がある。

ii) 前砂丘が侵食され始めている海岸

5(4)、砂丘近傍への養浜で述べたように養浜は選択肢として望ましい。

iii) 侵食と堆積がある空間領域に共存している海岸
バックパスの採用が適切と考えられる。

本稿の結論は、海岸侵食防止に養浜工の活用が勧められる。養浜について工学的技術的な研究に加えて、それ以外の一般的な事項への研究が必要である。

謝辞:本研究は平成 13, 14 年度日本大学学術助成金、国際総合研究「国土侵食防止についての研究」に拠るものである。アメリカ合衆国の養浜事例の情報には、研究分担者 Dr. Karl F. Nordstrom, Professor, Rutgers University, Institute of Marine and Coastal Sciences, の協力を得た。「5(4)砂丘近傍への投棄」は平成 14 年度科学研究費補助金基盤研究(C)2、課題番号 14550515 の成果の一部である。記して、著者等は関係諸機関、各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Valverde, H.R., Trembanis, A.C. and Pilkey, O.H. : Summary of beach nourishment episodes on the U.S. east coast barrier islands. *Journal of Coastal Research*, Vol.15, pp.1100-1118, 1999.
- 2) Bodge, K.R. and Olsen, E.J. : Aragonite beachfill at Fisher Island, Florida., *Shore and Beach*, Vol.60 (1), pp.3-8, 1992.
- 3) Freestone, A.L. and Nordstrom, K.F. : Early development of vegetation in restored dune plant microhabitats on a nourished beach at Ocean City, New Jersey., *Journal of Coastal Conservation*, Vol.7, pp.105-116, 2001.
- 4) Nordstrom, K.F. : *Beaches and Dunes of Developed Coasts*, Cambridge, Cambridge University Press, 338p, 2000.
- 5) Titus, J.G. : Greenhouse effect, sea level rise, and barrier islands: case study of Long Beach Island, New Jersey, *Coastal Management*, Vol.18, pp.65-90, 1990.
- 6) Smith, W.G., Rosati, J.D. and Lemire, A. : Revere Beach and Point of Pines, Massachusetts, shore front study. In Stauble, and Kraus, editors, *Beach Nourishment: Engineering and Management Considerations*, ASCE, pp.118-132., 1993.
- 7) National Research Council : *Beach Nourishment and Protection*, National Research Council, 334p., 1995.
- 8) Domurat, G. W.: Beach nourishment - a working solution, *Shore and Beach*, Vol.55(3-4), pp.92-95, 1987.
- 9) Sudar, R. A., Pope, J., Hillyer, T. and Crumm, J. : Shore protection projects of the U.S. Army Corps of Engineers, *Shore and Beach*, Vol.63 (2): pp.3-16, 1995.
- 10) Trembanis et al., 1999 Trembanis, A.C., Pilkey, O.H. and Valverde, H.R. : Comparison of beach nourishment along the U.S. Atlantic, Great Lakes, Gulf of Mexico, and New England shorelines, *Coastal Management* Vol.27, pp.329-340, 1999.
- 11) Houston, J. R. : Beach nourishment, *Shore and Beach*, Vol.63 (1), pp.21-24, 1995.
- 12) Irish, J.L., Lillycrop, W.J. and parson, L.E. : Accuracy of sand volumes as a function of survey density, *Proc. 25th ICCE*, ASCE, pp.3736-3749, 1996.
- 13) Oertel, G.F., Foster, W.G. and Graham, W.R. : Elements of a successful beach management plan, Sea Island, Georgia, In Tait, L.S. editor, *The Future of Beach Nourishment*, Tallahassee, FL: Florida Shore and Beach Preservation Association, pp.27-42, 1996.
- 14) Flick, R.E. : The myth and reality of southern California beaches, *Shore and Beach*, Vol.61 (3), pp.3-13, 1993.
- 15) Kana, T.W. and Mohan, R.K. : Analysis of nourished profile stability following the fifth Hunting Island (SC) beach nourishment project, *Coastal Engineering*, Vol.33, pp.117-136, 1998.
- 16) Houston, J.R. : Beachfill performance, *Shore and Beach*, Vol.59 (3), pp.15-24, 1991.
- 17) Davis, R.A., Jr. Wang, P. and Silverman, B.R. : Comparison of the performance of three adjacent and differently constructed beach nourishment projects on the Gulf peninsula of Florida, *Journal of Coastal Research*, Vol.16, pp.396-407, 2000.
- 18) Pilkey, O.H. : Another view of beachfill performance, *Shore and Beach*, Vol.60 (2), pp.20-25, 1992.
- 19) Jones, S.R. and Mangun, W.R. : Beach nourishment and public policy after Hurricane Floyd, *Ocean and Coastal Management*, Vol.44, pp.207-220, 2001.
- 20) Thieler, R.E., Pilkey, O.H., Jr., Young, R.S., Bush, D.M. and Chai, F. : The use of mathematical models to predict beach behavior for U.S. coastal engineering, *Journal of Coastal Research*, Vol.16, pp.48-70, 2000.
- 21) Wood, J.D., Ramsey, J.S. and Weishar, L.L. : Beach nourishment along Nantucket Sound: a tale of two beaches, In Tait, L.S. editor, *The Future of Beach Nourishment*, Tallahassee, FL: Florida Shore and Beach Preservation Association, pp.117-129, 1996.
- 22) Gibson, D.J. and Looney, P.B. : Vegetation colonization of dredge spoil on Perdido Key, Florida, *Journal of Coastal Research*, Vol.10, pp.133-143, 1994.
- 23) Stauble, D.K. and Holem, G.W. : Long term assessment of beach nourishment project performance., *Coastal Zone 91*, ASCE, pp.510-524, 1991.
- 24) Thieler, R.E., Gayes, P.T., Schwab, W.C. and Harris, M.S. : Tracing sediment dispersal on nourished beaches: two case studies, *Coastal Sediments 99*, ASCE, pp.2118-2136, 1999.
- 25) Kana, T.W. : The profile volume approach to beach nourishment, In Stauble, D.K. and Kraus, N.C. editors, *Beach Nourishment: Engineering and Management Considerations*, ASCE, 176-190, 1993.
- 26) Kieslich, J.M. and D.H. Brunt III. : Assessment of a two-layer beachfill at Corpus Christi Beach, TX, *Coastal Zone 89*, ASCE, pp.3975-3984, 1989.
- 27) van de Graaff, J., Niemeyer, H.D. and Overeem, J. : Beach nourishment, philosophy and coastal protection policy, *Coastal Engineering*, Vol.16, pp.3-22, 1991.
- 28) Allison, M.C. and Pollock, C.B. : Nearshore berms: an evaluation of prototype designs, *Coastal Zone 93*, pp.2938-2950, 1993.
- 29) van der Wal, D. : The impact of the grain-size distribution of nourishment sand on aeolian sand transport, *Journal of Coastal Research*, Vol.14, pp.620-631, 1998.
- 30) Rahoy, D. and Chase, S. : Small- to medium-scale backpassing extends fill life and upgrades protection, *Shore and Beach*, Vol.68(4), p2, 2000.
- 31) Mauriello, M.N. : Beach nourishment and dredging: New Jersey's policies, *Shore and Beach*, Vol.59 (3), pp.25-28, 1991.
- 32) Kana, T.W., Stevens, F.D. and Lennon, G. : Post-Hugo beach restoration in South Carolina, *Coastal Sediments 91*, American Society of Civil Engineers, pp.1697-1711, 1991.
- 33) Peterson, C.H., Hickerson, D.H.M. and Johnson, G.G. : Short-term consequences of nourishment and bulldozing on the dominant large invertebrates of a sandy beach, *Journal of Coastal Research*, Vol.16, pp.368-378, 2000.