

養浜工としての人工海藻の開発

運輸省神戸調査設計事務所 正会員 片岡真二
同 上 同 上 岩崎健次
同 上 同 上 寺川博也

1. まえがき

人工海藻を利用した新しい養浜工システムの開発理念は、「海岸侵食の防止」「快適でうるおいのある海岸創造」「景観に配慮」「水産協調型施設」といったキーワードで説明される。

大都市近郊の砂浜は今日ほとんどが消滅し、全国的に海浜侵食の危険性が問題化している。一方海浜は近年、余暇時間の増大とともにスポーツ・レジャーの場として、快適でうるおいのある憩いの場としてその役割が再認識されてきている。また埋立等、新たな海域開発にあたっては漁業補償の概念に積極的な水産増殖施設あるいは、水産協調型施設への配慮が取り込まれ、これからの養浜工は新しい発想による開発が望まれてきている。人工海藻はこのような要請を満たした養浜工の一つとして、利用できる可能性を有している。

人工海藻の開発の歴史は比較的新しく、1960年代に欧米で最初に始められ¹⁾、その後、局所的な洗掘対策工としては実用化への道を歩む一方、波浪を制御し大規模な侵食対策工として人工海藻を利用するまでには至っていないのが現状である。今回、この人工海藻を侵食対策工として利用しようとする研究にあたっては、まず過去の開発経緯から技術課題を調査することから始め、次いで人工海藻と従来の離岸堤等、養浜工と比較し、人工海藻に求められる機能を考察した。さらに二次元水槽による模型実験を行い人工海藻の、波高減衰効果、砂面移動特性等の水理特性について検討し、これと平行して理論研究を実施した。

人工海藻の波高の減衰機構は、離岸潜堤が堤体位置で碎波を助長し、急激に波高変化を生じさせるのに対し、人工海藻は波の進行に伴って徐々に抵抗体として作用し、比較的スムーズなエネルギー消散を行うため、人工海藻の設置位置では潜堤にみられるような局所的な洗掘あるいは陥没は生じないことが分かった。また背後の水位上昇を抑える効果も予想された。波高の減衰効果も条件によっては入射波の0.3以下にも達し、潜堤に匹敵する効果が認められた。

図-1は、従来の海岸防災施設と人工海藻と低天端護岸や階段式護岸を組み合わせることで海辺の景観やレクリエーション機能を阻害しないように配慮した海岸防災システムを比較したイメージスケッチである。

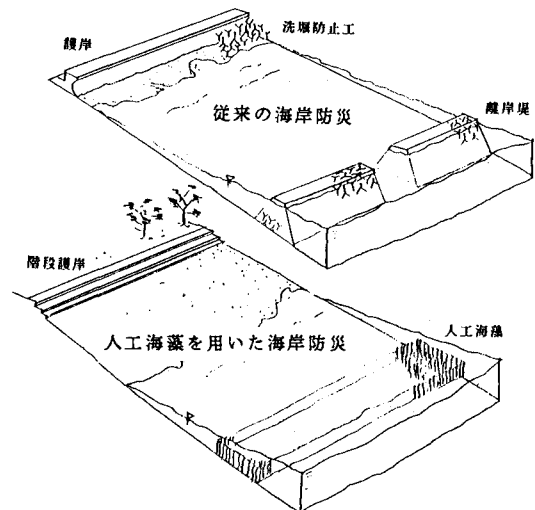


図-1. 海岸防災システムの比較

2. 現在の養浜工

現在広く用いられている侵食対策工には、大きく分けて次のような工法を単独、または複数の組合せによって施工されている。

①海岸護岸・堤防 ②消波堤 ③突堤 ④離岸堤

このうち、人工海藻に求められる機能は離岸堤の場合と同種のものであるが、離岸堤は近年、景観上の配慮または海水交換性能の向上のため、多少の機能の低下にかかわらず天端が水中に没した離岸潜堤として施工されることがある。海浜に潜堤を設置した場合、入射波は潜堤による水深の急激な変化により碎波し、岸向きの運動量の増大を伴いつつ堤内側へ飛び込む。その結果堤内側の水位は一般に上昇し、海浜への波の遡上や、潜堤開口部を通過しての冲向きの底層流が増大し、潜堤の砂浜保持効果が減少する²⁾。この様な潜堤の欠点と比較した場合、人工海藻は、透過式の潜堤よりさらに透過性能が高く海水交換性が良くなる。また波高の減衰機構も堤体位置で碎波を助長する急激な波高変化ではなく、徐々に波のエネルギーを消散させる方式のため水位の上昇、およびそれに伴う冲向き底層流速の低減が期待できると推察される。

3. 既往の研究

人工海藻の開発は、1962年頃から河口付近や海底パイプライン等の水中構造物周辺の局所的な洗掘対策としてヨーロッパで最初に始められた¹⁾。すでに商品化され、国内にも特許が導入されている。一方、人工海藻を用いて海岸侵食を制御する目的では、1985年に米国におけるフィールドテストの例がある²⁾。これは海岸より約 2.5km沖合の水深4.5m の海底に、ポリプロピレン（通常の荷造りロープに使用される素材）長さ1.8m の海藻を格子状のロープに取り付け、コンクリートアンカーで固定したもので、延長約 280m、幅約30mの敷設面積を持つものであった。

しかし設置後、数カ月で人工海藻が波により破壊され、アンカー（固定ロープ）はからまったり、位置が変化したりした。その後、米国では1975年頃から再びフィールドテストが行われているが、侵食に対する人工海藻の効果は見いだせないまま現在に至っている。

人工海藻による波高減衰の理論的研究は、最初のものとしてPrice らが1968年に発表した流体場を動粘性係数の異なる2層にモデル化し、人工海藻のある下層の粘性が増加することによって波高が減衰することを説明している⁴⁾。その後、Darlymple が1982年に人工海藻の葉状体を円柱にみたてて、これに作用する効力からエネルギーの逸散量を算定し、波高減衰を導いたものがある⁵⁾。

Price らのものでは人工海藻の形状と動粘性係数との関係が説明できていないこと、また Darlympleのものでは、計算上の波高減衰効果が現地で確認されるに至らなかったことなど問題が残されている。

欧米においては、この他に数多くの室内実験、フィールドテストが行われているが、そこで得られた結論は、局所的な洗掘防止においては効果が期待できるが、もっと大規模な海岸線の侵食を制御する目的では、現在のところ無効であると認識されていることである。また人工海藻の海底への固定方法も重大な課題として残されている。

今回、我々の実験を進める中で、人工海藻により波高を減衰させるためには、人工海藻の素材の剛性を高くし、波に対する抵抗力を増大させてやる必要があることが分かった。すなわち、これまでのフィールドテストでは天然海藻のようにしなやかな柔構造の素材が用いられてきたが、波高の減衰を望むのであれば、従来の海藻様としたものにとらわれず、もっと弾性による復元力をもった素材を用いる必要がある事を示唆している。

4. 水理模型実験

(1) 人工海藻の波高減衰機構

養浜工としての利用の可能性を検討するため、まず人工海藻による波高の減衰実験を行い、次に人工海藻による砂面変形に関する実験をおこなった。

人工海藻は高分子化合物を用いた化学繊維の使用を想定しており、構造体の形状によって波動場での運動特性が大きく変わる性質がある。人工海藻は従来の海岸施設に使用される捨石、コンクリートあるいは鋼材のように、その材料の性状が比較的容易に規定されるものでなく、人工海藻の性状あるいは形状を定義することが大きな問題となってくる。これまでの人工海藻に関する理論的な解析において一般性のある解を得にくくしている原因の一つがここにある。今回の実験では人工海藻による養浜工を実現するために、出来るだけ波高減衰効果が大きくなる構造体を模索していった。ここでは、人工海藻の実海域での設置を想定した一様斜面上での人工海藻に関する規則波実験の結果を中心に報告するものである。

人工海藻の設置位置ではエネルギーの連続性により、次のエネルギーの関係をうる。

$$EI = ER + ET + EL$$

ここでEI、ER、ET はそれぞれ入射波、反射波、透過波のエネルギーをELは単位水路幅当りの波が一波長の間に人工海藻で失うエネルギーを表す。このELについては次の原因が考えられる。

ア) 人工海藻がたわむために要するエネルギー

イ) 人工海藻の内部領域での渦の起生により消費するエネルギー

ウ) 人工海藻の動揺周期と波の位相差によるエネルギー消費

ア) は水中に置かれた弾性板などが有する性質⁶⁾である。イ) は格子状の透過式消波構造物あるいは流れに置かれた水中植物などにみられる性質である。ウ) は最近、新形式構造物として開発の進むフレキシブルマウンド⁷⁾ やテキスタイルを利用した消波構造物⁸⁾ の持つ消波メカニズムである。

各種透過性構造物はそれぞれ卓越するエネルギー消費のメカニズムが異なるが、人工海藻の場合は上記の3つの消波効果を合わせ持った構造物と考えることが出来る。

(2) 人工海藻模型に関する予備的実験

まず波高の減衰効果を決定する要因としては、人工海藻の形状、設置位置、波浪条件がある。この人工海藻の形状については予備的な実験を行った。過去において人工海藻の素材として化学繊維のポリプロピレンやポリエチレンが主として使用されてきた。これは浮力、引張強度、耐摩耗性の物理特性に優れ、大量生産が可能で、安価で、さらにテープ状の形態に加工しやすい材料性が求められた結果である。実験に使用した素材は市販されている荷造ロープで、A素材（ポリプロピレン発泡状）、B素材（ポリエチレン）、C素材（ポリプロピレン）の3つの素材を選定した。

表-1 実験に用いた素材の性能

名 称	単位	A素材	B素材	C素材
材 質		ポリプロピレン	ポリエチレン	ポリプロピレン
品 名		HF-15.5mm	タフロー	HM-15.5mm
形 状		ソフトタイプ(発泡)	2枚重ねの袋状	一般タイプ
色		緑	白	緑
幅	mm	15.5±0.5	51.0	15.5±0.5
厚 み	mm	0.57±0.05	0.0204	0.81±0.03
破断強度	Kg	>130	47	>140
破断伸度	%	<20	17	<25
比 重		0.54	0.96	0.90
備 考			2枚重ねの性能	

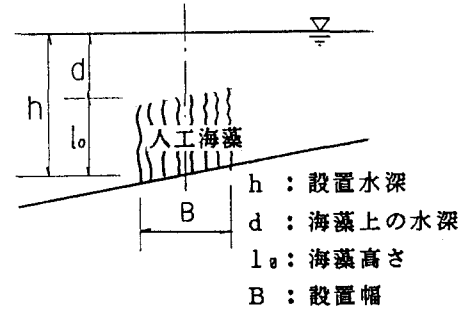


図-2. パラメーター定義

水路延長方向の波高分布を調べたものが図-3である。この3素材のうち最も波高減衰効率の良いのは、剛性の最も高いC素材であった。図-4は植生密度等を変化させたケースの波の透過位置における人工海藻なしと人工海藻ありの波高比KHで整理したものである。植生密度については、植生密度の増加とともに大きくなるものの、一定の植生密度（この場合では植生密度 949本/m²）以上増やしても効果はそれほど大きくなりえない傾向が認められた。

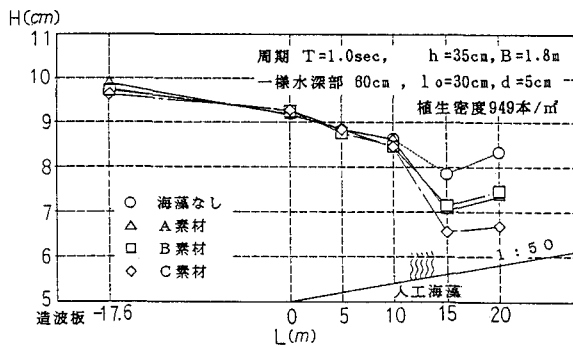


図-3. 人工海藻の素材検討

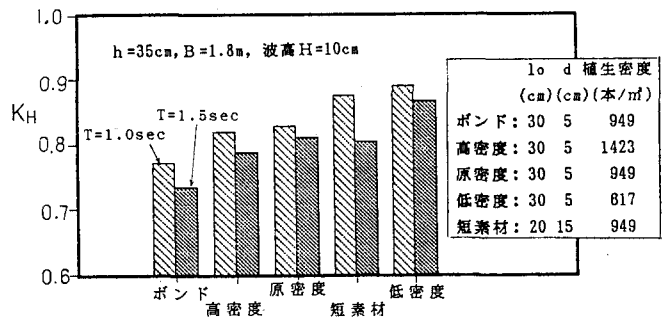


図-4. 人工海藻の植生密度等の検討

海藻天端水深は、水面に近づき浅くなるほど波高減衰効果が高くなる。

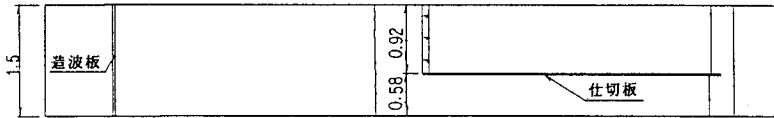
海藻長さについては、模型を30、20、15cmと順次短くしていったが、これは海藻1枚の幅が一定値（1.55cm）であることから海藻長さが短いほど素材の剛性が高くなる。素材の材質に関する実験で得られた結果と同じく、剛性が高くなるほど著しく波高減衰効果がよくなる。また海藻長さが長くなると海藻頭部の波力による曲げモーメントが大きくなり波の動きに追従するようになる。これは水粒子の相対速度を減少させ海藻の抵抗力を低下させる原因となる。また葉状体の支持板（模型では金網を使用）との固定はボンドでしっかり止めた方が効果は大きかった。これらの結果、人工海藻の波高減衰効果は、C素材（ポリプロピレン、比重 0.9）が最も良く、長さについてはある程度短いほど大きく、また支持板との固定はボンドにより接着した方が効果が大きいことがわかった。これを参考になるべく波高減衰効果の大きい構造体で以降の実験を行った。

(3) 波高減衰実験

実験は神戸調査設計事務所水理実験所内、二次元造波水路において行った。この水路は長さ64.0m×幅1.

5m で、今回の実験は斜面の延長方向にベニヤ板の仕切りを取り付け水路幅を92cmにして行った。造波機はピストン式、幅1.5m×高さ1.5m、8.3Kw（ミナーシャモーター）である。実験縮尺は模型を特定の海域に限定せず、人工海藻が使用可能と予想される現地水深および水路延長の関係から $S=1/20$ と想定した。海底勾配は比較的緩い場合の1：50の勾配とした。実験施設および作成した人工海藻模型の形状は図-5、6に示すとおりである。

長水路 平面図



断面図

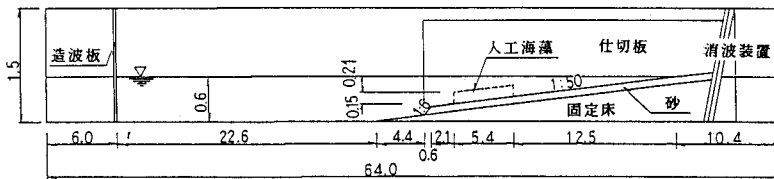


図-5. 実験施設

詳細図

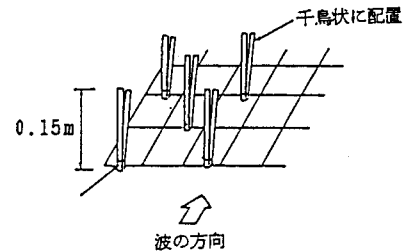


図-6. 人工海藻模型

写真-1. 人工海藻模型

上記のC素材を約30cmに切断して2つ折りにし金網にまわしてボンドで金網に固定し、さらに外れないようにホッチキスで止めてこれを千鳥状に配置した。植生密度は949本/m²である。また海藻の設置水深は海藻上に船舶が航行可能となるように最低で現地で2m（模型では10cm）のクリアランスがとれるよう設置した。海藻の設置幅（水路延長方向の設置距離）は、1波長以上であることを目安に金網（91cm×90cm）6枚分の5.4mとした。周期1.4secの波では約1.8波長となる。

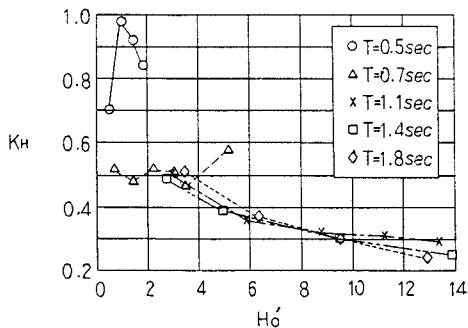
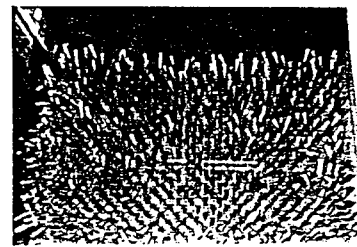


図-7. 入射波と波高減衰効果の関係

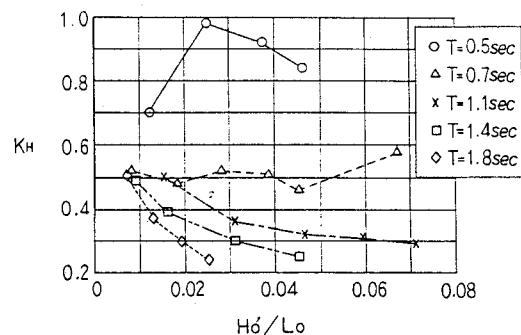


図-8. 波形勾配と波高減衰効果の関係

図-7は前述のKHを用いて入射波の関係を調べたものである。また入射波は沖位置における換算沖波 H_o' で表示した。T=0.5secケースを除いては周期に関して明瞭な差は表れていない。入射波高 H_o' が大きくなるほど効果が大きくなるが、人工海藻はある程度の周期と波高のときに効果が大きくなる性質があるといえる。この形状で最高KH=0.24になったのは、潜堤に匹敵する効果が得られたことになる。

水路方向の波高分布については、図-9に示すように海藻の設置位置において、延長方向にほぼ直線的に波高が減衰している。この場合海藻設置位置が岸へ向かうほど天端水深が浅くなり、海藻による波高減衰効果は大きくなる。また設置位置前面での波高の増大は見られず反射波が極めて小さいことを表わしている。

一方、海藻より岸側の水位の上昇量については、潜堤の場合は堤体背後に著しい水位上昇量があるのに対して人工海藻の場合はほとんど水位上昇はないか、むしろ水位上昇が減少する傾向が認められた。

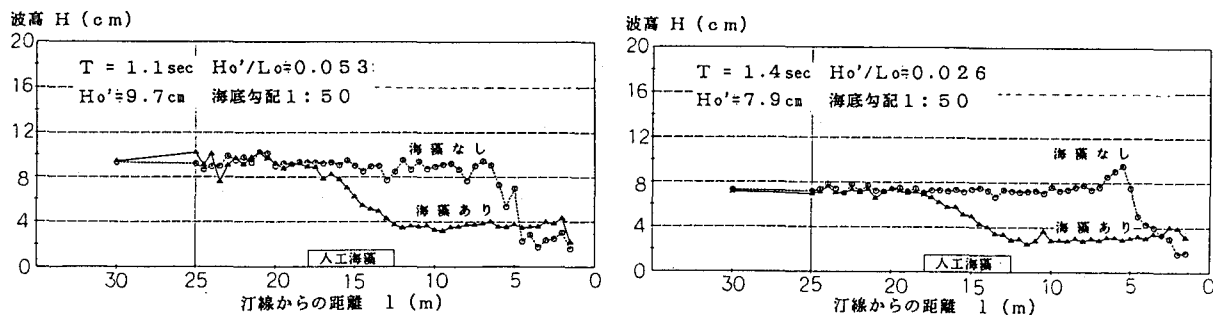


図-9. 水路延長方向の波高分布

(4) 移動床実験

底質の材料は珪砂7号、比重2.63、中央粒径0.145mmをモルタルの固定床に10cm厚さに敷均した。砂面の測定は人工海藻設置位置のほぼ中央部より岸に向かって50cmピッチで行った。砂面の高低差は砂連の3波長分の高低差をスケールで読み取りその平均値をその測点での値とした。測定は波作用後15分、30分、60分、120分、180分、240分、360分、480分後の8回である。各時間毎に一旦波を止め砂面の測定を行い、再び波を作用させてその累計時間を波作用時間とした。

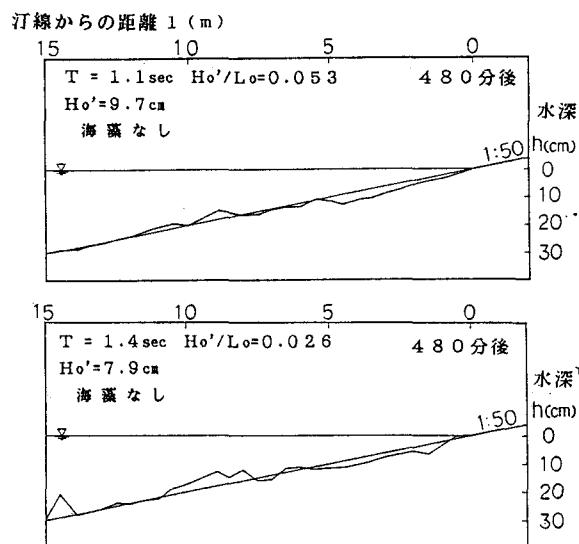


図-10. 人工海藻なしの砂面変化

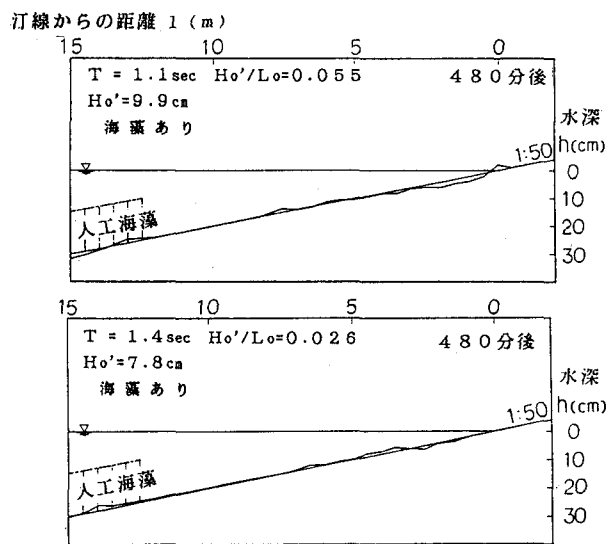


図-11. 人工海藻ありの砂面変化

人工海藻を設置したことによる砂面の移動特性は図-10、11の海藻あり・なしを比較した図のように、かなり砂の変形を抑止することができる。潜堤の実験では、入射波は潜堤から離れるに従って、その波が一樣斜面上での波に近づくことが確認されているが⁹⁾、このことは砂面の変形に関して言えば、堤体背後では減衰された波高がもたらす一樣斜面上の砂面変形と一致することを意味している。これを人工海藻の場合において調べたところ、ほぼこれと同様の結果が認められた。すなわち、人工海藻背後の砂面変形は、人工海藻により減衰された波高が一樣斜面にもたらす変形であり、減衰波によってのみ砂面変形は決定されると考えて良いことになる。もうひとつの砂面変形の特徴は、潜堤で問題となる堤体前面での激しい洗掘は生じないことである。人工海藻設置位置では、波による海藻の動揺によって、砂連の発生が確認されるが、局所的な洗掘は認められない。これは潜堤が碎波の助長により急激な波高変化を生じさすのに比べて、人工海藻の波高減衰は波に対し徐々に海藻の抵抗力によってエネルギー消散が行われ、流体中で碎波ほどの激しい乱れは生じないためである。これは潜堤と比較した場合、最も特徴的な性質ではないかと思われる。

5. 理論研究について

養浜工としての人工海藻に関する理論的な研究は、「人工海藻の開発検討会」を組織して実施したもので、これまでに京大の酒井助教を中心とするグループにより、人工海藻による波高減衰モデル¹⁰⁾、海浜に敷設

した場合の平面的な波浪変形を考慮することのできる波浪変形モデル¹¹⁾、人工海藻に働く波力算定モデル¹²⁾が開発された。まず波高減衰モデルは水深を2層に分け、下層では海藻に作用する効力を考慮し、上層との境界面付近の粘性によるエネルギー逸散と、海藻の流体抵抗によるエネルギー逸散を求めたものである。

平面波浪変形モデルは、波高減衰モデルを放物型方程式に導入したものである。さらに波力モデルは、人工海藻の弾性を考慮し片持ち梁に作用する波力を基本式にしているが、海藻の変位が高さに比例するところから、固定部ではヒンジを仮定したモデルの運動方程式になっている。

6. あとがき

人工海藻を養浜工として実用化するための問題点は、まず実験で得られた成果を発揮するための剛性を持つ素材の選定から始めなければならない。これには相似則の問題も生ずることになるが、これまでの天然の海藻様としたものにとらわれず弾性板の様な材料を用いる方針で検討を進める必要がある。

一般に養浜工の実施に際しては、砂浜の持つ諸々の機能を解明し、その相互評価を行って、再現すべき砂浜特性を明らかにすることが必要である。これは多分に生態学的あるいは環境化学的な問題に属するものであるが、人工海藻のような従来と異なった養浜のメカニズムを持つ工法を実施するに当たっては、上記のことに配慮し、人工海藻を使用する適地の選定を行うことになる。

ここまでの調査からは人工海藻は外洋に面して大波浪が発生する海域には使用できないが、内湾の海水浴場、人工ビーチ、漁業施設での消波工といった目的ではその効果を十分に発揮する。

さらに公共事業の施策のうち特に海と人との接点に事業主体を持つ港湾においては、M.T.P、コースタル・リゾート、さらに親水性ゾーンを取り込んだ人工島などのプロジェクトのように、市民レベルでの環境空間の創造事業が計画されており、人工海藻の技術がここでも必ず要請されるものとなるであろう。

(参考文献)

- 1) S. Rogers : Artificial Seaweed for Shoreline Erosion Control, North Carolina State Univ., Rep. No. P 886-217437, P. 18 (1986)
- 2) 入江 功・菅原一晃・滑川伸孝：宇久須港海岸人工海浜造成に関する水理模型実験、港湾技研資料No. 602 (1987)
- 3) Wicker, Clarence F. : Report on Artificial Seaweed, Shore and Beach, ASBPA, pp. 28-29. 1966.
- 4) Price, W.A., Tomlinson, K.W. & Hunt, J.N. : The Effect of Artificial Seaweed in Promoting the Build-up of Beaches, Coastal Engineering Conference, ASCE, Chapt. 36, pp. 570-578. 1968.
- 5) Darlymple R.A. and P.L.-F. Liu. : Waves over Soft Muds; A Two Layer Fluid Model, J. Phys. Ocean, pp. 1121-1131 (1978)
- 6) 杉本修一・西村益夫・前野賀彦：水面下にある弾性板による波浪透過について、第25回海岸工学講演会論文集 (1978)
- 7) 田中正博・三俣正和・大山 巧・清川哲志・宇多高明・村井禎美：フレキシブルマウンドによる透過・反射特性の実験的検討、第34回海岸工学講演会論文集 (1987)
- 8) 渡会英明・大橋康広・長崎作治：テキスタイルを利用した消波構造物の開発、第34回海岸工学講演会論文集 (1987)
- 9) 高山知司・永井紀彦・関口忠志：広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験、第32回海岸工学講演会論文集 (1985)
- 10) 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎：海藻が繁茂する場の波高減衰の特性、第35回海岸工学講演会論文集 (1988)
- 11) 間瀬 肇・古田幸也・酒井哲郎・浅野敏之・柳生忠彦：傾斜海浜に設置した人工海藻による波浪変形解析、第36回海岸工学講演会論文集 (1989)
- 12) 運輸省神戸調査設計事務所：人工海藻による養浜工開発調査 (1989)