

アマモ場造成のための底質安定工法「鋼製マット」の開発

森口朗彦*・高木儀昌*・山本 潤**・大村智宏**・吉田吾郎***・
寺脇利信****・棚田教生*****・山野井秀夫*****

Development of “Steel-made mat” the industrial method stabilizing at sea bottom for eelgrass-beds creation

Akihiko MORIGUCHI*, Norimasa TAKAGI*, Jun YAMAMOTO**, Tomohiro OMURA**, Goro YOSHIDA***, Toshinobu TERAWAKI****, Norio TANADA*****, and Hideo YAMANOI*****

Abstract: Sea grass beds will continue to decrease. One of the causes is deemed the effect of intensified waves and currents, which result from plain-shaped coasts due to bulkhead construction in addition to the destruction of sea grass beds directly caused by reclamation. Sand and mud at sea bottom, where sea grasses take roots, are readily moved and sea grasses are dug out to run off, leading to the degeneration of sea grass beds. Environment with quit waves is important for restoring sea grass beds. However, the construction of large structures such as breakwaters not only costs a huge amount of money but also changes surrounding environment significantly. In order to stabilize sand and mud movement at sea bottom while conserving surrounding environment as much as possible, an idea to sheet sea bottom with pieces of a structure similar to floor cushion was conceived. Sea grass seeds imbedded in the structure germinate and grow through voids provided in it. Steel plates and steel nets were used as the material to avoid adverse effects on environment. Hence, the structure was named “steel-made mat”. After grasping their basic stabilization functions at sea bottom by laboratory experiments, a construction test at site was carried out in an actual sea region. As a result, a sea grass population as dense as natural ones was formed.

Key words: eelgrass-bed creation, steel-made mat, stabilization functions at sea bottom

アマモ場は、消失する最も大きな要因が生育海域の埋立であり（吉田ら，2006），特に，比較的波浪の厳しい海域では，埋立護岸などで海岸の形が単調化し，波や流れの影響が強まり，アマモが根をはる海底の砂や泥（底質）が不安定となって動きやすくなることで，アマモの地下茎が掘り出されて流失し衰退することも考えられる。比較的波浪の厳しい海域においてアマモ場造成を行う場合，漁港の防波堤のような構造物を沖

側に設置し，アマモの生育域を外海の厳しい環境から遮断することは，巨大な構造物を海域に設置するための費用を要し，周辺海域に及ぼす様々な環境影響も懸念される。

天然アマモは，比較的波浪の厳しい海域では，土壌中に点在する礫・貝殻等の集積物に根を絡ませ（平岡ら，2000），地下茎を四方に張り巡らせることで，自ら底質を安定させている（森口ら，1999）。これらの

2006年2月7日受理 水産総合研究センター業績水工研C第39号

* 水産土木工学部漁場施設研究室

** 水産土木工学部開発システム研究室

*** 瀬戸内海区水産研究所

**** 研究調査部

***** 徳島県農林水産総合技術支援センター水産研究所

***** 岡山県水産試験場

知見を考慮して、近年、空隙のあるマット状の構造物にアマモ種子を播種し、海底面に敷き詰めて底質を安定させつつ、アマモ場を造成するという手法が試みられたが（たとえば植木ら，1996，和泉ら，2002），地下茎が想定通りには伸長しないことのほか，経済性，施工性，環境影響等に改良の余地があると考えた。

そこで，本研究では，ある経過時間内に腐食・崩壊するため環境影響が小さく，かつ安価であるという特性を有する鋼を材料としたマット状構造物「鋼製マット」を考案し，模型実験およびアマモ場造成にかかる現地試験の結果から，その機能について検証し，考察を深めた。

方 法

1 鋼製マットの概観と基本機能

鋼製マット単体は概観が上部工と下部工に分かれており（Fig.1），さらに，上部工はマット形状を保持するための構造工および上面覆い工，漂砂保持工，播種

袋保持工，下部工は播種袋保持工および構造工よりなる（Fig.2）。主材料は，構造工には鋼板，その他にはエキスパンドメタルを用いた。単体の大きさは，造成海域の海底面の起伏の状況や使用できる施工機材，あるいは事業規模等によっても異なると考えられるが，ここでは1m×1m程度の大きさを想定して描いた。

鋼製マットには，アマモ場造成に関し，次のような基本機能を設定した。

発芽条件を良好にする機能：上部工の凸状上面覆い工およびその下の凸凹状の漂砂保持工により，上部工内部の空間の流速を低減する。マット内部にアマモ種子を保持することで，目的とする位置に種子を定位させるとともに，波浪や潮流による散逸を防止する。また，外周囲から流れによって移動してくる漂砂を上部工内部に捕らえる。こうして砂泥を堆積させることにより海水からの酸素の供給を遮断するとともに，マット自体の腐食による酸化作用により，播種体保持部内の砂泥層を還元状態に誘導し，アマモ種子の発芽条件を

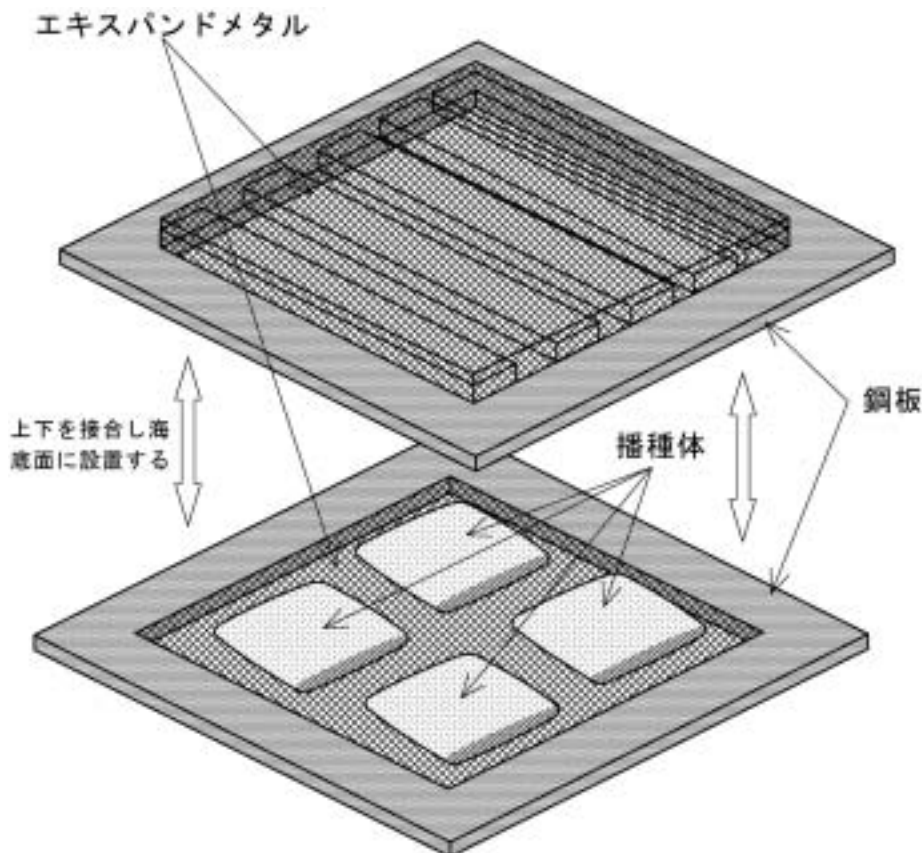
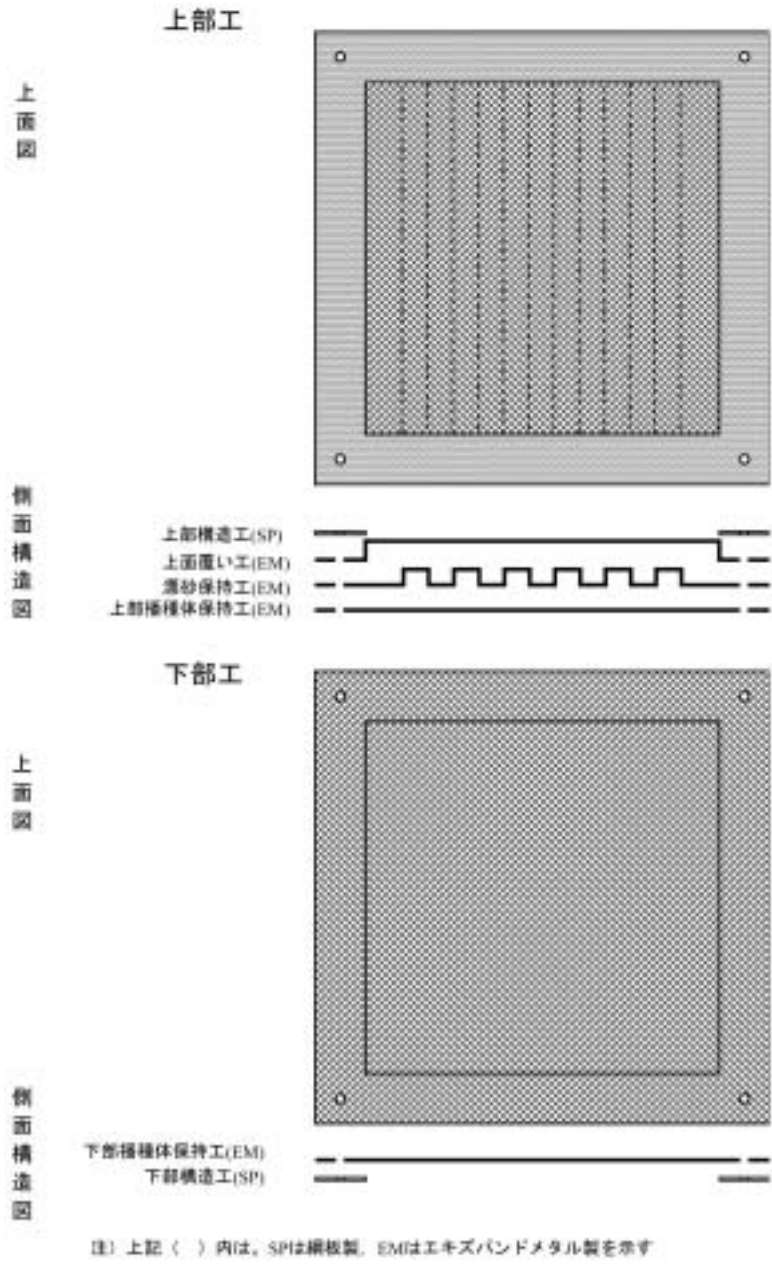
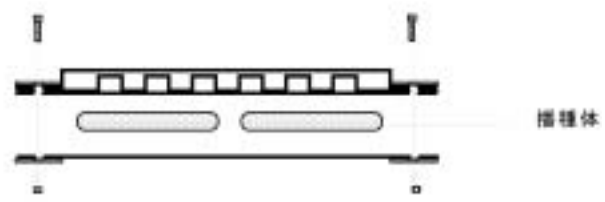


Fig. 1 鋼製マット概観



現地組立側面図



種子袋を挟み込み、ボルトで締める

完成側面図



Fig. 2 鋼製マット基本構造

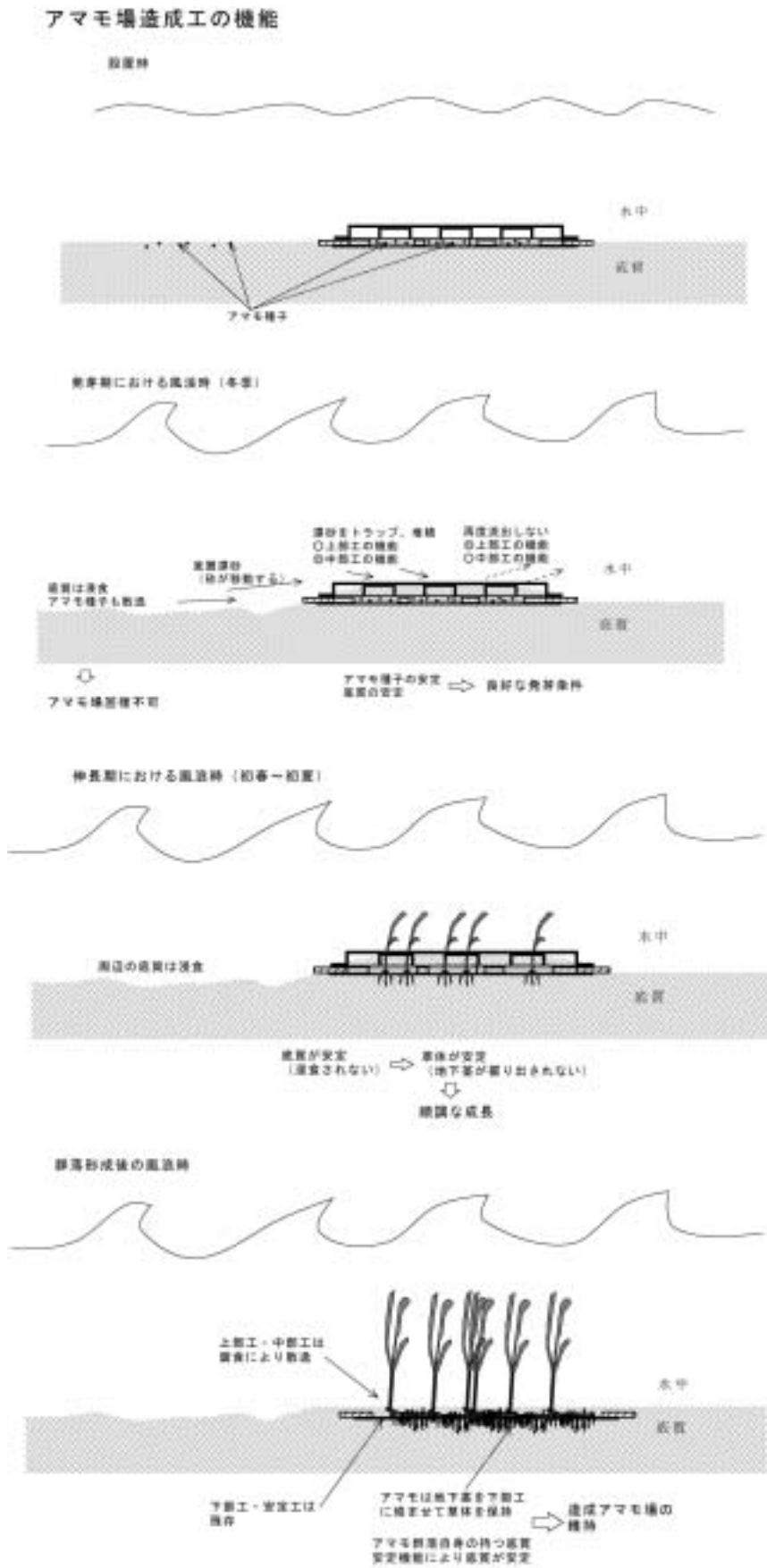


Fig. 3 鋼製マットの基本機能

好適にする機能を設定した。

出芽・生長条件を確保する機能：上面覆い工はアマモ場造成工上面の流れをスムーズにし、捕らえた砂泥の再度の飛散を押さえる。こうして底質を長期間安定することによりア播種体内のアマモ種子のマット外への出芽と生長中の草体の洗掘による流失を防止する。

アマモ成体を保持する機能：比較的波浪が厳しい海域において、アマモ群落はパッチ状に形成され、アマモは地下茎を大きい礫や古い地下茎などに地下茎を絡ませて草体を維持している。鋼製マットの下部工には生長したアマモがここに地下茎を絡ませて草体を保持する機能も設定した。上部工は砂面より高い位置にあり構造工以外が比較的早期に腐食し消失する設定としたが、下部工は底質内にあるなどの理由から長期に存在する設定とした。アマモ群落は、一旦、形成されると、自身の持つ底質安定機能により内部に底質が保持され、長期に維持される。

施行を円滑にする機能：鋼製マットは底質安定機能および地下茎保持機能を有する構造物部分とアマモ種子とが一体的な構造となっており、陸上で組み立てた後、海底面に敷設するだけでアマモ場が造成される。

アマモ場の形成過程に対応した鋼製マットの機能を示した (Fig.3)。種子着底期～出芽期 (秋～冬期) に

は、波浪の厳しい海域に着底したアマモ種子は、波浪により流体力を受けて散逸し、その場で出芽する可能性が低い。鋼製マット内に納められた種子は、内部の流速が押さえられ、上部が捕えた底質で覆われることにより安定な状態で出芽時期を迎える。出芽期～生長期 (初春～夏期) には、波浪の厳しい海域に出芽したアマモ幼体は、波浪による流体力が大きくなる形状となり、波浪時に底質が不安定になり地下茎を保持する作用が小さくなることから容易に散逸する。アマモ場造成工において出芽したアマモ幼体は、底質が安定していることから散逸する可能性が小さく、順調に生長を続ける。さらにその後のアマモ場形成期には、鋼製マット上で生長したアマモは、下部工に地下茎を絡ませて草体を保持する。鋼製マットでは、上部工の構造体以外が腐食し消失することから、地下茎の伸長を阻害するものがなくなり、シート状の地下茎群体が形成され、アマモ群落が長期に維持される。

2 底質安定機能に関する模型実験

2.1 実験装置

水産工学研究所に設置されている「増養殖水理実験棟風洞付き造波水路実験施設」を用いた (Fig.4)。水路は、諸元が長さ70m、深さ2.2m、幅0.7mで、端部に造波装置を有している。水路内において、造波板より約50m離れ、底部より約0.6m高さの位置を起点とし、起点より造波板設置位置方向 (以降「沖側」) 7.6mの

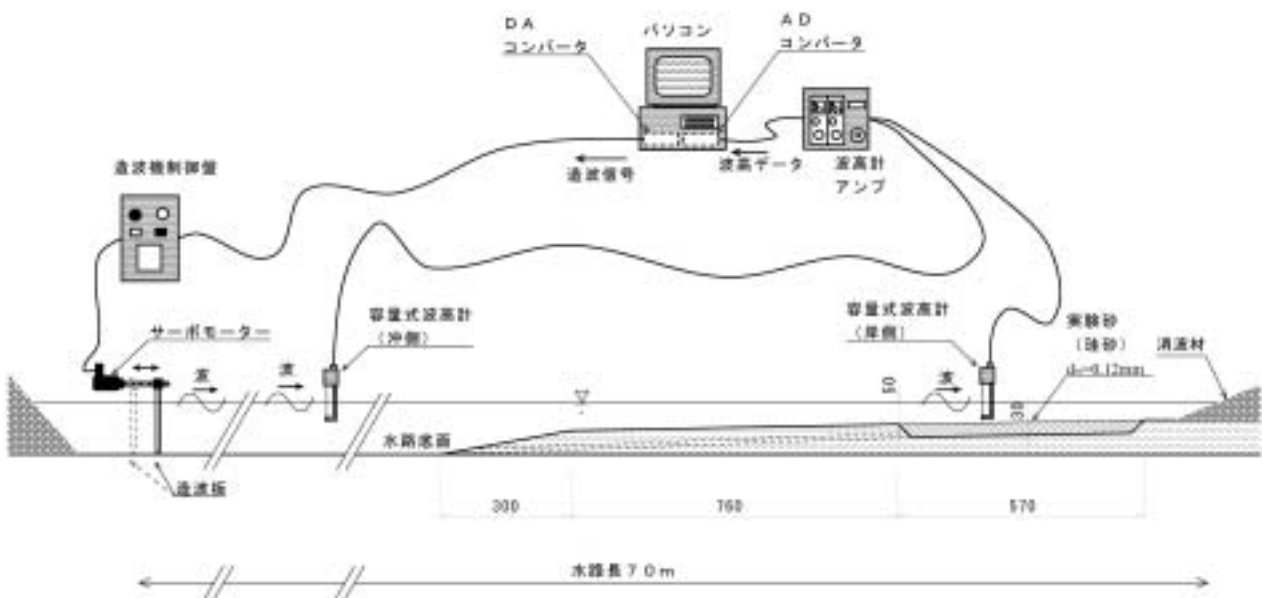


Fig. 4 実験施設概観

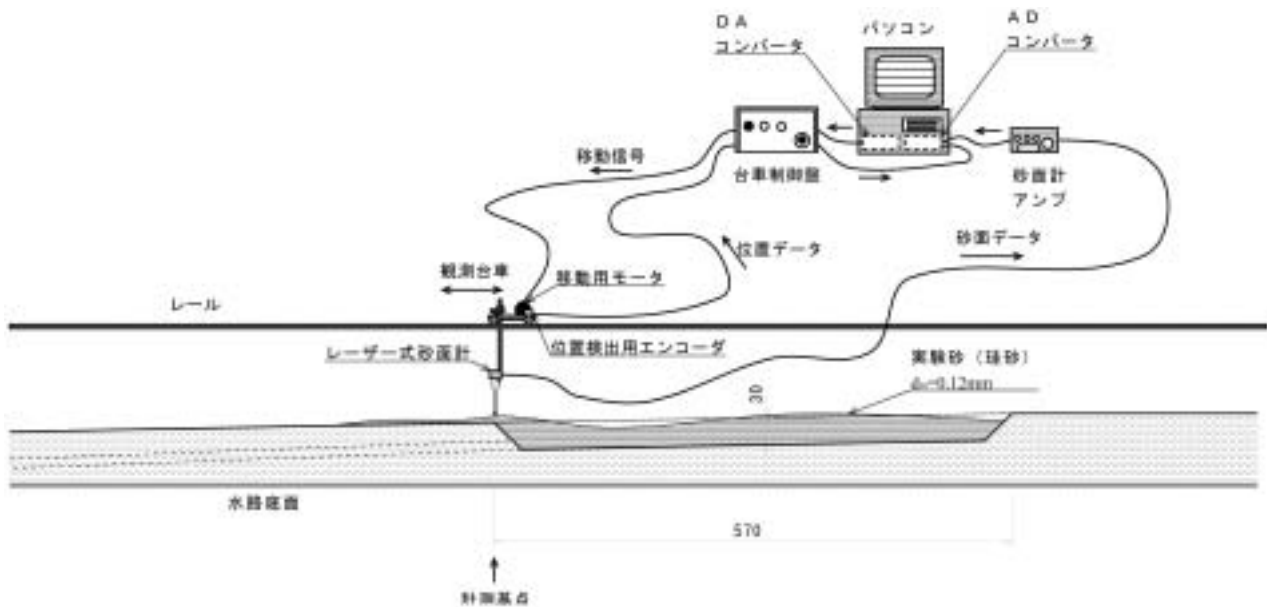


Fig. 5 砂面形状計測システム概観

位置より造波板設置位置逆方向（以降「岸側」）に向かって勾配 1/50 のコンクリート床を設置し、最岸側部には多孔性の消波材を設けた。コンクリート床の一部において、起点より岸側方向5.7mを深さ0.3mのポケットとし、に中央粒径0.12mmの珪砂を敷き詰め、実験模型海底（以下「移動床」）とした。

実験の想定縮尺は施設規模等から 1/8 とした。実験条件は、現地実証試験実施予定海域である徳島県鳴門市榎木浜および山口県大島郡周防大島町厨子ヶ浜地先の波浪発生状況（森口ら，1999）等を勘案して水深 0.5m（現地換算 4m，以下同）、波条件を規則波とし、波高・周期としては0.094m，2.12sec（7.5m，6sec）および0.125m，2.83sec（1.0m，8sec）の2種類を用いた。

実験手順としては、移動床をコンクリート床と同様の様斜面に整形し、所定の波を8時間作用させ、移動床の断面形状を計測した。砂面形状計測システムを示した（Fig.5）。砂面計測には株式会社キーエンス社製レーザー距離計LK-500を用いた。

2.2 実験模型

実験に供した鋼製マット模型および付帯物の概観を示した（Fig.6）。図中の「期待堆砂量」とは、構造材

の部分を除く構成マット模型の体積であり、マットが補足しうる最大の漂砂量と見なされ、実際の堆砂量との比で鋼製マットの漂砂保持機能を示すのに用いる。基本的な考え方は、魚礁での空 m^3 と同じと考えて良い。

模型1は基本形であり、実海域実証試験に供した鋼製マットの大多数がこの形状をしている。漂砂保持工下には、播種体に見立て不織布が設置してある。模型2および3は、海中に近い位置にある上部覆い工と漂砂保持工の部分の木角材の組み合わせで制作したもので、ハイブリッドと称した。木材は、部材形状の違いによる漂砂保持機能の違い、および、実海域実証試験時において腐食・消失特性および環境影響の違いを把握することに用い、かつ、森林間伐材の利用促進にも配慮した。付帯施設として、マット模型の端部洗掘防止のためマット沖側に設置する洗掘防止板を2種類試作した。付帯模型1は単なる平板で、大きさは鋼製マット模型の面積の半分であり、付帯模型2は板を山形に折り曲げて加工し、潜堤を模した。また、漂砂が生じない小さい波の条件での実験では、強制的に底質を動かし、部分的に漂砂を発生させ、マット上の堆砂を促す翼状堆砂促進工を、水路を横断するように設置した（Fig.7）。

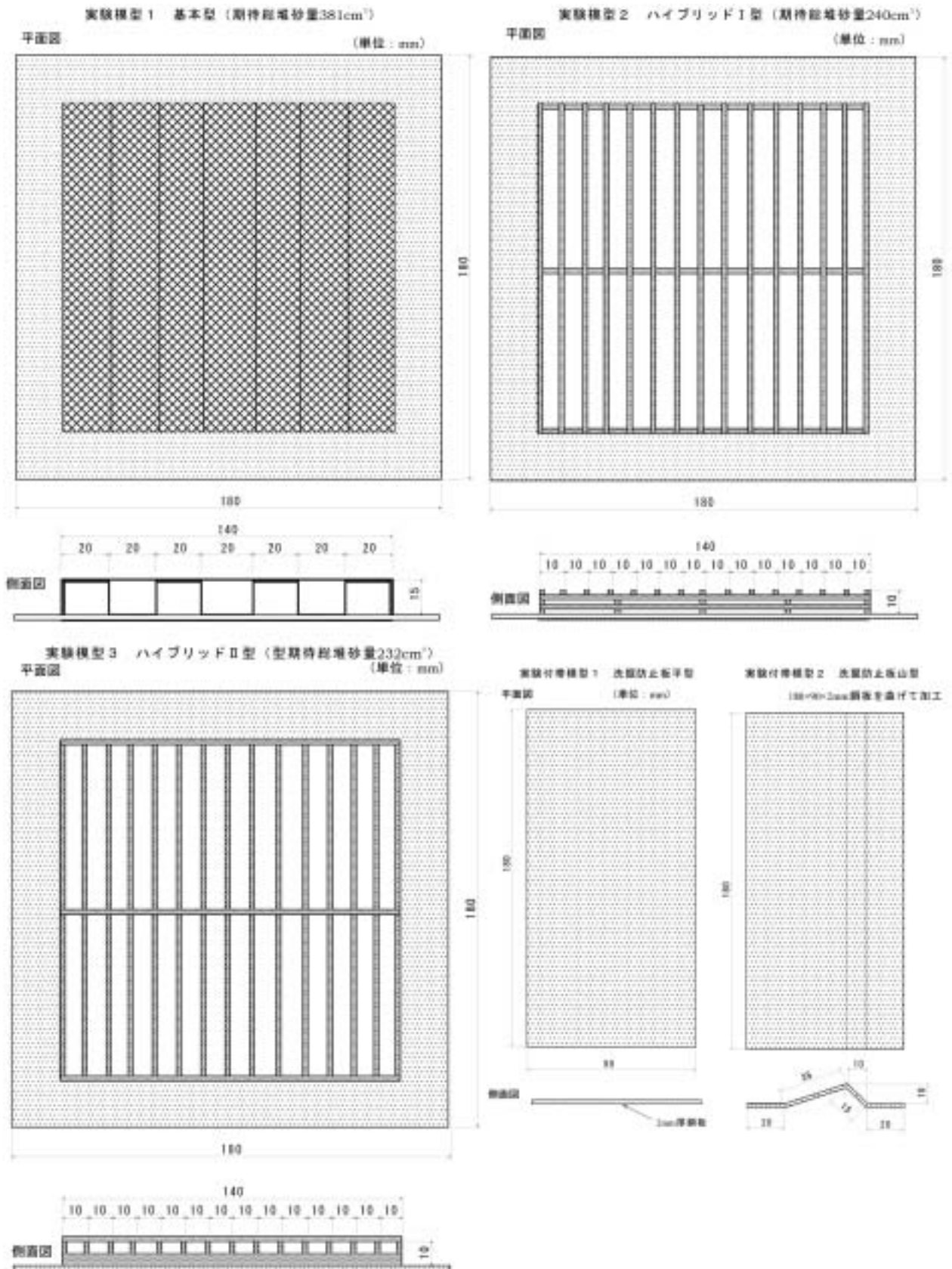


Fig. 6 実験模型構造図

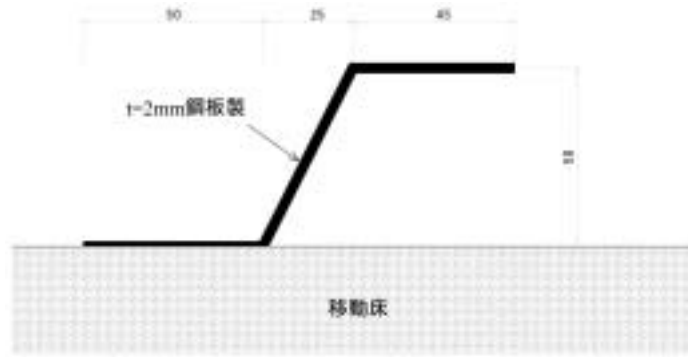


Fig. 7 翼状堆砂促進工実験模型断面図



Fig. 8 榑木浜位置図

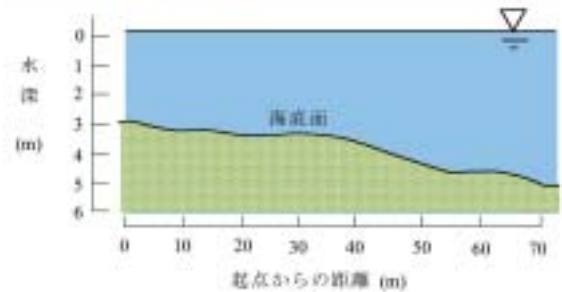
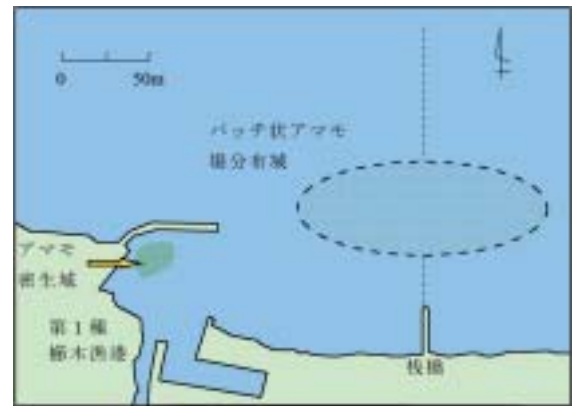


Fig. 10 榑木浜アマモ分布図



Fig. 9 榑木浜地形図



Fig. 11 返子ヶ浜位置図



Fig. 12 逗子ヶ浜地形図

3 実海域におけるアマモ場造成機能実証試験

3.1 試験実施海域

実証試験を実施した海域は、徳島県鳴門市榎木浜地先と山口県大島郡周防大島町(試験実施当時は東和町)逗子ヶ浜地先の2地点である。

榎木浜は鳴門市の瀬戸内側に面しており (Fig.8), 北方向に開いた比較的開放性の高い海岸 (Fig.9) である。波浪条件は冬期に有儀波高 (以下同) で最大2m程度の波浪が観測され、内海としては比較的厳しい波浪条件となっている (森口ら, 1999)。アマモの生育状況は、数株から十数株よりなるパッチ状のアマモ場が点在するほか、海岸西端にある漁港内泊地に大規模かつ濃密なアマモ群落が形成されている (團ら, 1998a) (Fig.10)。

逗子ヶ浜は山口県の瀬戸内海側に位置する屋代島の東端北側で広島湾の広島市対岸にあり (Fig.11), 榎木浜同様、北方向に開いているが北東および北西に島が存在し、波浪エネルギーの一部はここで遮蔽されている (Fig.12)。波浪条件は通常では年最大で1m程度と榎木浜よりは穏やかではあるが、内海としてはやや厳しい。アマモの生育状況は、一連の砂浜海岸であるがアマモ場の形成される場所と形成されない場所があり、形成する場でのアマモ場は長径数十m規模の離れ島状をした濃密なものであるが、一部は消失し、残りも経年的な消長を示しつつもやや衰退傾向にある (森口ら, 2004a)。試験実施地点は、過去に濃密なアマモ場が形成されていたが、1999年冬期に消失し、その後回復が認められない箇所とした (Fig.13)。

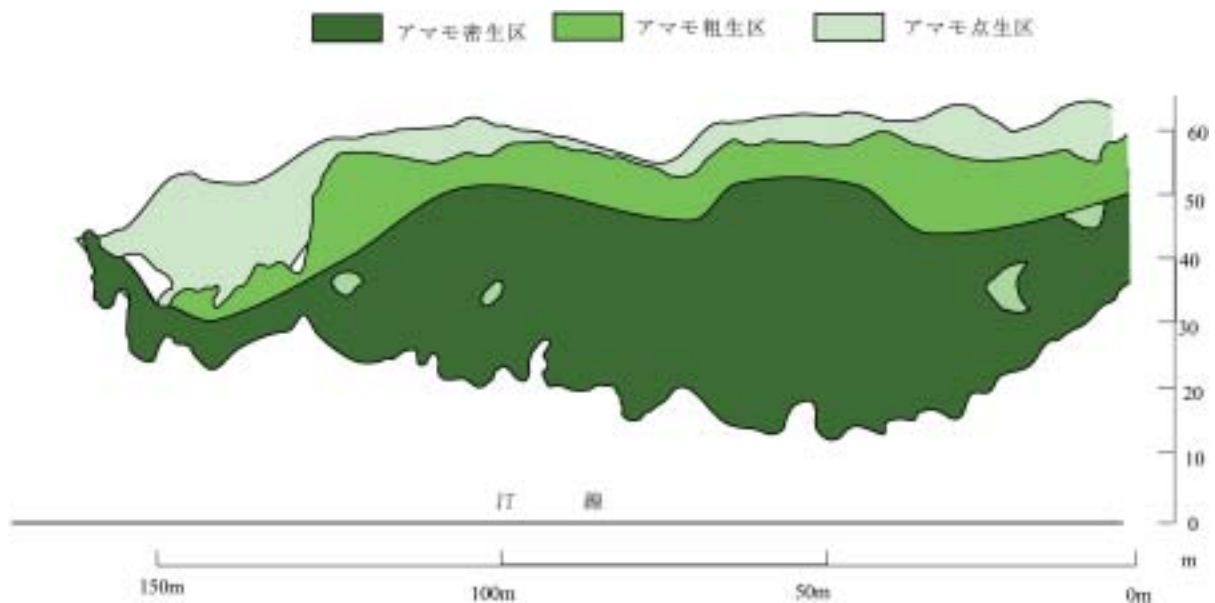


Fig. 13 逗子ヶ浜に形成されていたアマモ場の形状

3.2 試験時期および検証項目

アマモの生殖過程として、有性生殖と無性生殖の2過程がある。有性生殖過程の年間サイクルの概略は、春期から初夏期に花枝を形成して種子を放出し、夏期から秋期を種子として過ごし、冬期に出芽した後、春期に向けて生長する。無性生殖過程では春期から初夏期に草体が生長し、晩夏期から秋期に衰退、初冬期から初春期に地下茎を分枝して生育範囲を拡大し、また春期に草体が生長するというサイクルを示す(川崎ら, 1988)。本実証試験においても、年末近くあるいは年明け早々にマットの設置を行い経過観察を続けるとともに、年度が切り替わった時点において種子の採取と熟成・保管およびマットの改良点の抽出と作成を行って次の試験の準備をするという年間サイクルをとった(Fig.14)。実証試験は5回実施した。以下にその概要を示すが、各実証試験の年度は、マットを海域に設置したときのもので表した。

1998年度鳴門市榎木浜実証試験(以下「榎木浜期」): 試作鋼製マットの基本的なアマモ群落形成機能および施工性の確認, 問題点の抽出。

1999年度鳴門市榎木浜実証試験(以下「榎木浜

期」): 前期の結果に基づく改良。

2000年度周防大島町逗子ヶ浜実証試験(以下「逗子ヶ浜 期」): 波浪条件のやや穏やかな海域における適用性の検討および造成規模の効果の検討。

2001年度周防大島町逗子ヶ浜実証試験(以下「逗子ヶ浜 期」): 海域特性に応じた改良。小規模分散設置による海域環境の位置的な違いに対する適用性の検討。翼状堆砂工の機能評価。

2002年度周防大島町逗子ヶ浜実証試験(以下「逗子ヶ浜 期」): マットを1枚ずつ互い違いに設置する市松状分散設置による造成面積確保のための検討。播種体に緩効性肥料を混和。ハイブリッドマット試験。

年度毎の鋼製マット構造や設置の詳細は、検討の流れがわかりやすいよう、結果の章に時系列で示すこととする。ただし、播種体としてはすべて徳島県農林水産総合研究センターで開発された、ガーゼ袋内に海砂と腐葉土および種子を入れる方法(團ら, 1998b)を用いた。種子数は1マットあたり約1,000粒とした。

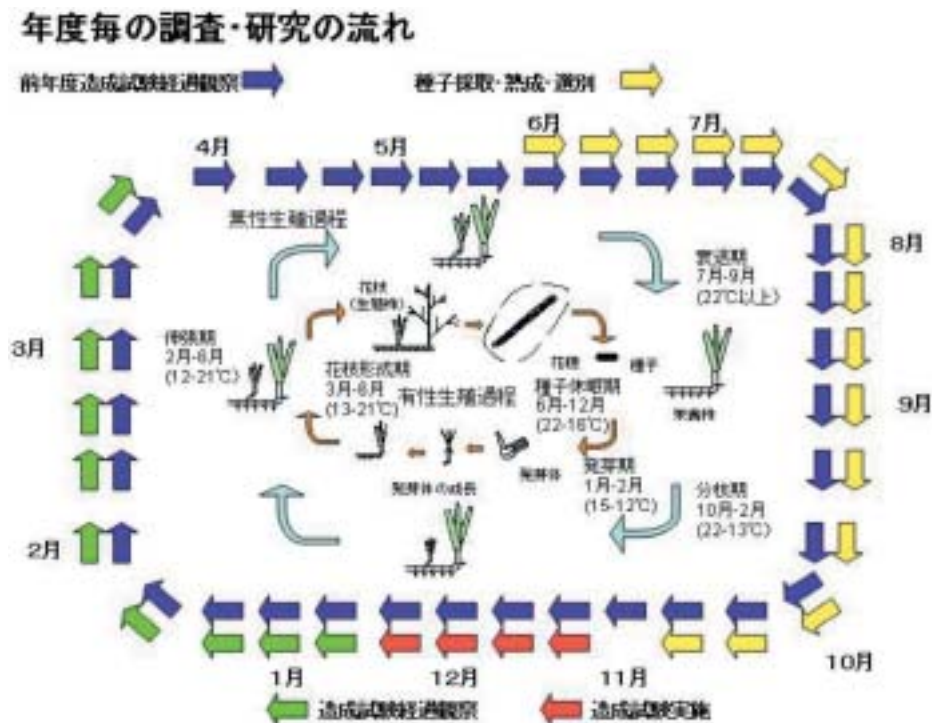


Fig. 14 アマモの生活史(川崎ら, 1988)と現地試験の年間サイクル

結 果

2 底質安定機能に関する模型実験

2.1 海底面形状に及ぼすマット等設置の影響

波高 $H=0.125\text{m}$ 、周期 $T=2.83\text{sec}$ の規則波を8時間作用させた後の、移動床の断面形状を示した（Fig.15）。図中、黒線が移動床の初期形状を示し、一様勾配に整形した。黄線が模型等を設置しない条件のものであり、漂砂移動が生じ、移動床最岸側および起点より1.6mの位置を中心に浸食が生じ、起点付近および起点より3.0mの位置に堆積する傾向となった。断面形状を初期形状に再度整形し、浸食の生じた起点より1.6mの位置に鋼製マット模型を設置し、同様に8時間波を作用させた後の断面形状を図中赤線で示した。設置位置において浸食は生じず、近傍、特に岸側方向が模型が無い

場合は浸食傾向であったものが堆積傾向に転じた。

波高 $H=0.094\text{m}$ 、周期 $T=2.12\text{sec}$ の波を用いた実験結果を示した（Fig.16）。模型が無い条件では、移動床は砂れんが生じるのみで、漂砂移動はきわめて小さく、断面形状の顕著な変化は見られなかった。断面形状を初期状態に整形して、起点より1.0mの位置に堆砂促進工、1.6mと2.1mの位置に鋼製マット模型を設置し、同様に8時間波を作用させた後の断面形状を図中赤線で示した。堆砂促進工の沖側は変化が見られなかったが、直下の移動床が大きく浸食し、沖側鋼製マット設置位置付近に堆積している。また、起点より3～4mの部分も浸食を受けていた。目視により観察した堆砂促進工の漂砂発生機構を示した（Fig.17）。波により低層付近では振動流が生じるが、沖向きの時、堆砂促進工直下では渦が発生し、実験砂が舞い上がった。振動流が岸向きに変わると、舞い上がった砂は岸側に移

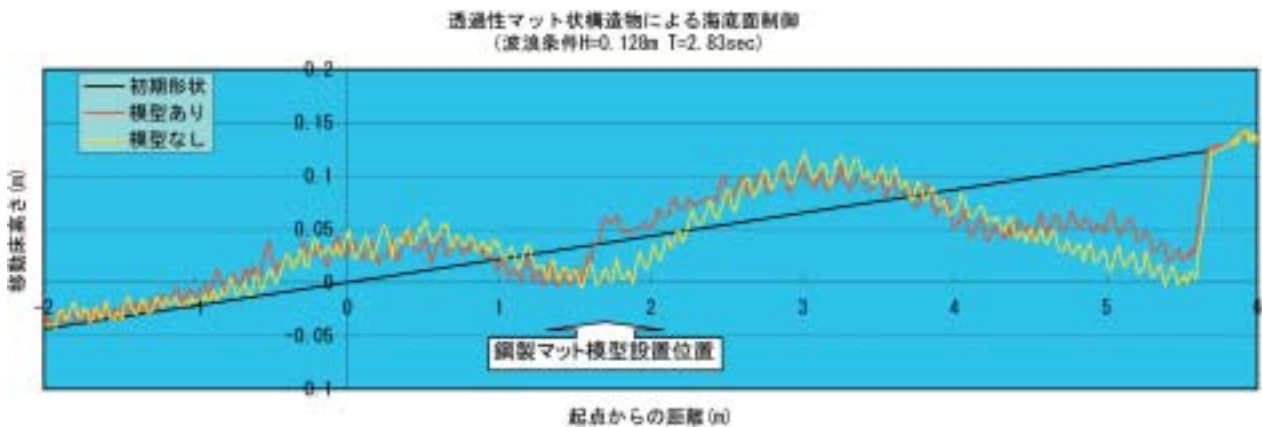


Fig. 15 鋼製マットによる漂砂制御に関する移動床断面形状変化

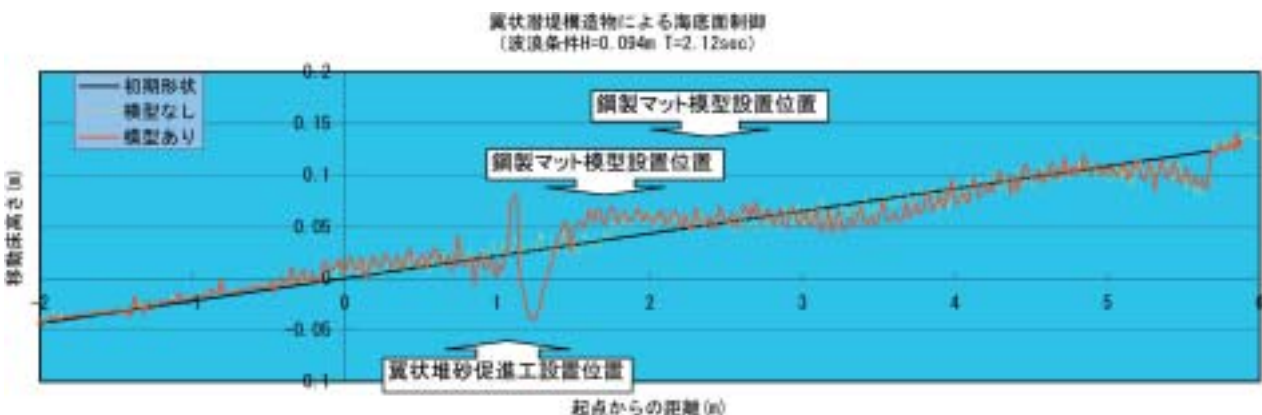


Fig. 16 翼状堆砂促進工による漂砂制御に関する移動床断面形状変化

動し堆積した。このとき、堆砂促進工沖側では常に流れは円滑で乱れは少なかった。堆砂促進工直下が浸食され空隙が広がると、渦はさらに大きくなり、砂の移動量はさらに増加した。

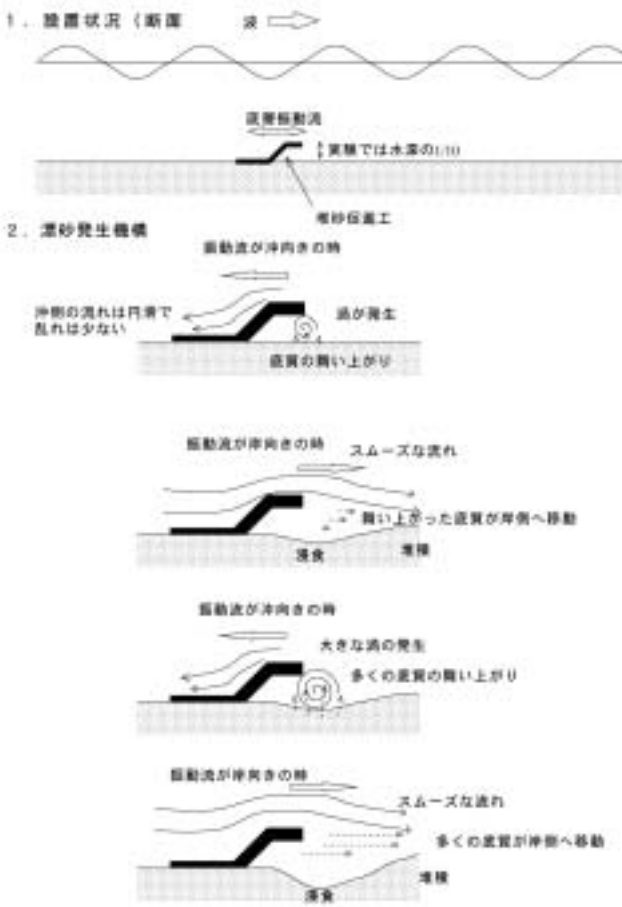


Fig. 17 翼状堆砂促進工による漂砂発生機構模式図

2.2 鋼製マットの形状および付帯構造物と漂砂保持機能

8時間所定の波を作用させた後、マット模型上にある実験砂量を計量した結果および期待総堆砂量との比を堆砂率を示した (Table.1)。

漂砂移動が生じる波条件 (H=0.125m, 周期T=2.83 sec) での基本型マット模型を用いた実験 (実験ケースHNN) では、堆砂率は約6割であるが、実験終了時の模型の状況を示したPhoto.1と比較してわかるように、堆砂率は上部覆い頂が砂に覆われる面積比率とほぼ同じであった。2.1に述べた断面形状への影響を把握するため実験時間を8時間としたが、波を作用させて1時間程度で、ほぼ実験終了時の堆砂状況と同じ状況となっていたことを目視では確認した。洗掘防止工の無い場合 (実験ケースHNN), マット模型沖側端部が全体面積の約1割程度洗掘を受けていたが、模型の安定性に影響はなかった。洗掘防止工を設けると洗掘はほとんど生じない。また、洗掘防止工は漂砂保持機能にも寄与しており、平型 (実験ケースHNP) で約1割, 山型 (実験ケースHNM) では3割近くも堆砂率が増加していた。

漂砂移動が小さい波条件 (H=0.094m, 周期T=2.12 sec) では、鋼製マット模型を設置しただけ (実験ケースLNN) では堆砂率は小さく、上部工上まで実験砂が堆積する状況は見られなかった。一方、翼状堆砂促進工を設置すると、基点より1.6mの位置に設置した鋼製マット模型 (実験ケースLNW1) は、期待総堆砂量を上回る堆砂が生じた。これは、鋼製マットの漂砂保持機能によるというよりは、翼状堆砂促進工により設置位置が堆積傾向となり、鋼製マットが埋没したといえる状況であった。上記の実験と同時に行った、基

Table. 1 鋼製マット堆砂機能模型実験条件・結果一覧

実験ケース	模型	設置位置 (起点よりm)	付帯物	模型との間隔 (m)	波高 (m)	周期 (sec)	堆砂量 (cm ³)	堆砂率	備考
HNN	基本型	1.6	無し		0.125	2.83	235	0.617	
HNP	基本型	1.6	平板	0m	0.125	2.83	273	0.717	
HNM1	基本型	1.6	凸板	0m	0.125	2.83	347	0.911	
HNM2	基本型	1.6	凸板	0.05m	0.125	2.83	288	0.756	
LNN	基本型	1.6	無し		0.094	2.12	131	0.344	
LNW1	基本型	1.6	翼状潜堤	0.5m	0.094	2.12	612	1.606	埋没
LNW2	基本型	2.1	翼状潜堤	0.5m	0.094	2.12	50	0.131	
HNW12 (LNW1より継続)	基本型	1.6	翼状潜堤	0.5m	0.125	2.83	1074	2.819	埋没
HNW22 (LNW2より継続)	基本型	2.1	翼状潜堤	0.5m	0.125	2.83	473	1.241	埋没
HH1N	ハイブリッド1	1.6	無し		0.125	2.83	230	0.958	
HH2N	ハイブリッド2	1.6	無し		0.125	2.83	178	0.767	
HH1P	ハイブリッド1	1.6	平板	0m	0.125	2.83	180	0.750	
HH2P	ハイブリッド2	1.6	平板	0m	0.125	2.83	182	0.784	



Photo. 1 実験終了時の鋼製マット模型の状況

点より2.1mの位置に設置した鋼製マット模型（実験ケースLNW2）では、堆砂はほとんど生じなかったが、引き続き波条件を大きく（ $H=0.125\text{m}$ ，周期 $T=2.83\text{sec}$ ）し、同様に8時間波を作用させると（実験ケースLNW22）、基点より1.6mの位置に設置した鋼製マット模型同様に実験砂内に埋没した。

ハイブリッドマットも堆砂機能が高く、特に細い角材で組んだ型（実験ケースHHN）で堆砂率が9割を超える結果となった。

3 実海域におけるアマモ場造成機能実証試験

3.1 榑木浜 期

使用した鋼製マットの構造を示した（Fig.18）。この時点では上部工と下部工には別れておらず、四角い板枠状の構造部にエキスパンドメタル製の上面覆い工等をボルトで固定していた。底面から上面覆い工上面までの高さ（以降「マット厚さ」）は約100mm、漂砂保持工の凸部は3個である。使用したエキスパンドメタルは、メッシュ長方向50mm，短方向22mm，太さ3.5mm程度のもの（JIS規格XS43）を用いた。また、洗掘防止のため、鋼製マット構造工と同じ大きさの6mm厚鋼板を用いた。

種子は徳島県産多年性種子を使用した。

組み立てから設置作業では、主にエキスパンドメタル部が外力で容易に変形することに起因する種々の問題が生じ、試験に供した10枚を製作するのに2時間以上、船上積み込みおよび設置作業にも同程度の時間を要した。

設置箇所は、当該海域において波浪観測を行った際、アマモ場内観測地点と称した箇所近傍で（森口ら、1999）、周辺はアマモがパッチ状に分布している。配

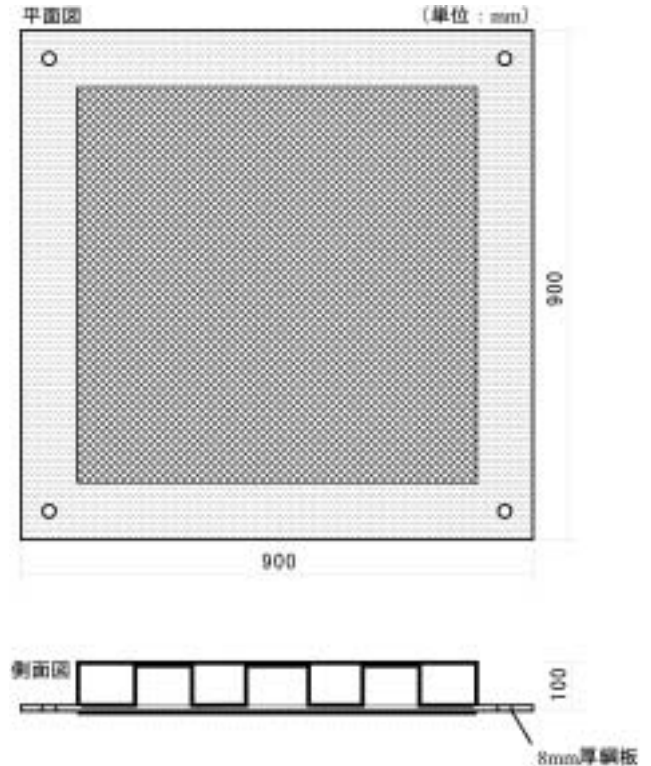


Fig. 18 試作鋼製マット構造図

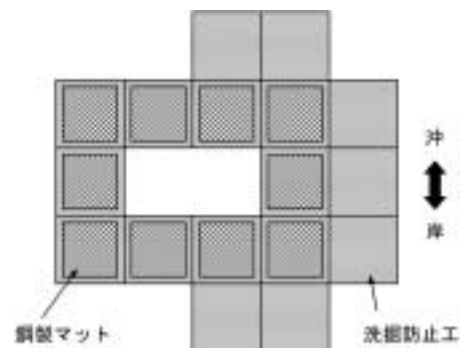


Fig. 19 鋼製マット配置図（榑木浜 期）

置は岸沖方向3枚，汀線方向4枚の四角形状とし，沖方向を見て右側の外周に洗掘防止板を設置した（Fig.19）。海底への固定は，構造工に設けた孔に長さ500mm太さ10mmの綱杭を通して海底に打ち込みむことにした。

設置作業は榑木浜の天然アマモが出芽する1999年1月に行った。その後の経過観察では，マット内部には若干の堆砂が認められたものの，マット上面に達するほどではない。上面覆い工には，多量の付着物が生じた。アマモ種子は多少の出芽が認められたものの，マット上面へ突出することはなく消失した。

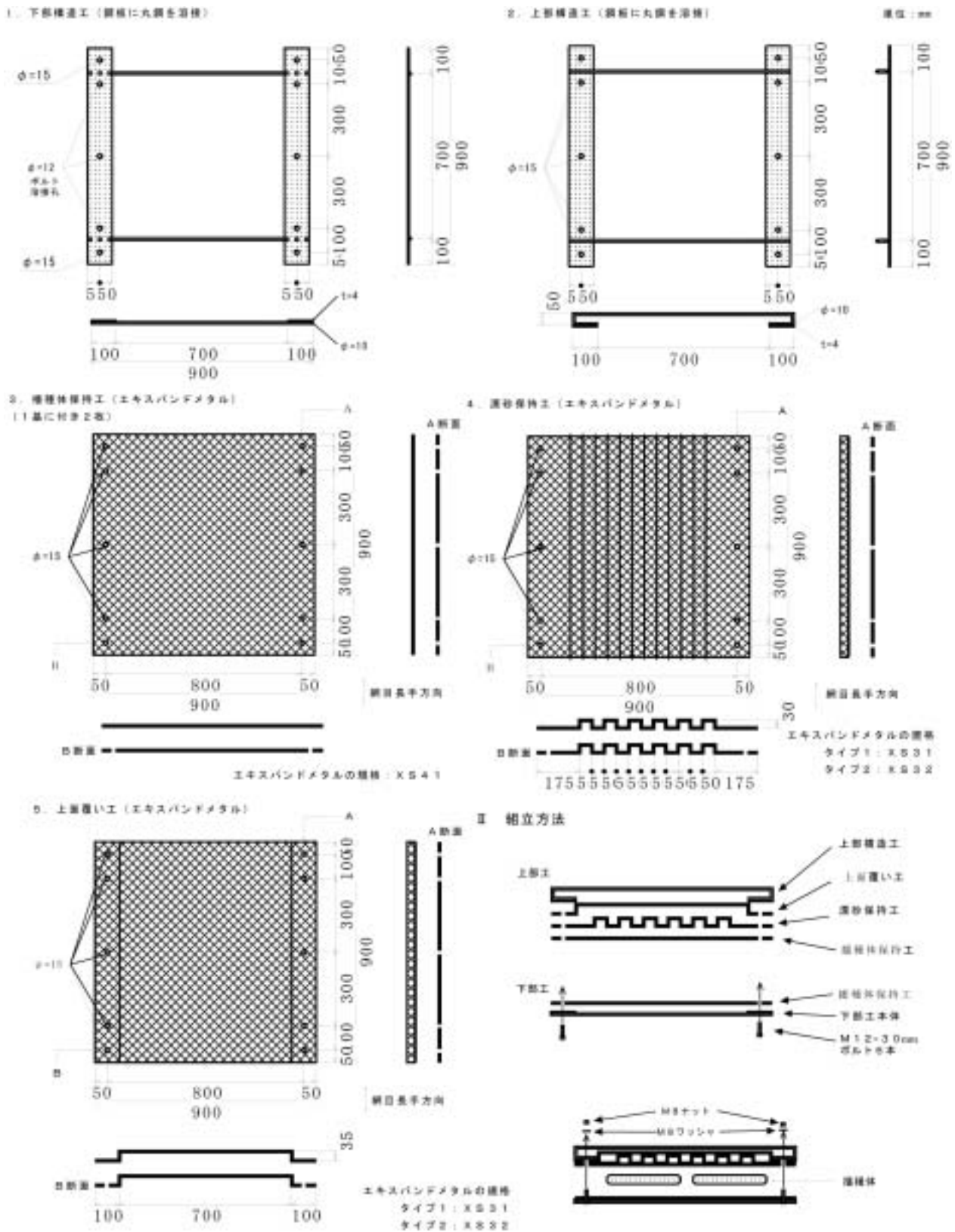


Fig. 20 改良型鋼製マット構造図

3.2 櫛木浜 期

改良型鋼製マットの構造を示した (Fig.20)。主な特徴としては、構造工を細長い鋼板 2 枚を 2 本で鋼棒で連結した構造とした点で、上部構造工の連結鋼棒は上面覆い工および漂砂保持工を護るよう設けている。厚さは35mmとし、漂砂保持工凸部も倍増の6箇所とした。使用エキスパンドメタルは、播種体保持工をメッシュ長方向50mm、短方向22mm、太さ2mm程度のもの (JIS規格XS41) とし、上面覆い工および漂砂保持工をメッシュ長方向30mm、短方向12mm、太さは1.5mm程度のもの (JIS規格XS31) と2mm程度のもの (JIS規格XS32) を用いた。洗掘防止工として9000×4500mm鋼板を用いた。

種子は、岡山県産単年性種子を使用した。

現地組み立て作業は約1時間で設置作業も約1時間で完了した。

配置は、汀線方向に4枚1連を1セットとして岸沖2箇所に設置した (Fig.21)。

設置作業は前年度の櫛木 期よりやや遅い2000年2月に行った。設置から2ヶ月経過した4月には出芽が確認され、3ヶ月経過した5月には草丈が200mmを超えるまで生長した。この時点で設置位置での差異は認められず、株数は鋼製マット1枚あたり62株であった (Fig.22)。この海域の天然アマモ場 (團ら, 1998a)

のひとつのパッチと比較して面積は広く株数も多い。その後も順調に生長を続け、設置より6ヶ月経過した8月には十分に生長したアマモ群落が形成された (Photo.2)。しかし、翌9月になると突然枯死が始まり、設置から8ヶ月経過した10月にはアマモはほぼ全部が消失した。周囲の天然アマモも多くは枯死しているが残存しているものもあり、鋼製マット上の枯死状況の方が顕著であった。

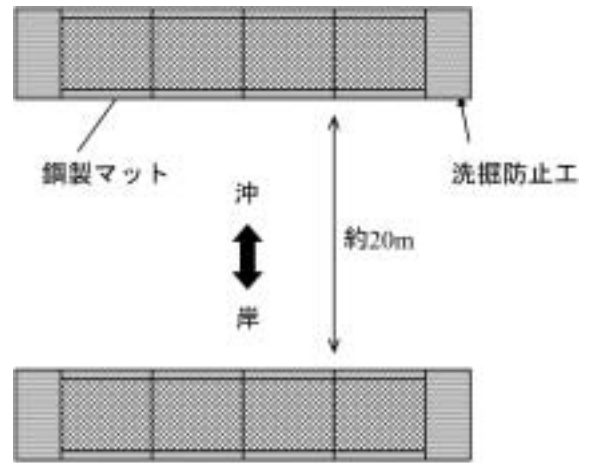


Fig. 21 鋼製マット配置図 (櫛木浜 期)

12株 250mm	9株 200mm	8株 150mm	33株 200mm	11株 200mm	6株 150mm	36株 250mm	16株 200mm
21株 200mm	16株 200mm	11株 150mm	18株 150mm	27株 250mm	4株 150mm	7株 200mm	13株 200mm

沖
↑↓
岸

注：鋼製マットを4分割して計測
上段が株数、下段が葉長

46株 230mm	8株 150mm	33株 130mm	9株 130mm	16株 230mm	22株 250mm	20株 250mm	9株 200mm
21株 200mm	7株 150mm	12株 100mm	5株 120mm	10株 130mm	4株 270mm	13株 250mm	16株 120mm

Fig. 22 鋼製マット上のアマモ生長状況 (櫛木浜 期3月)



Photo. 2 鋼製マット上のアマモ群落形成状況
(櫛木浜 期8月)

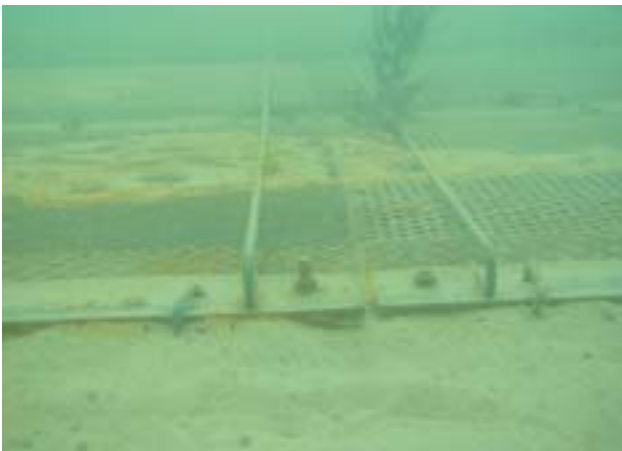


Photo. 3 堆砂状況(櫛木浜 期3月)

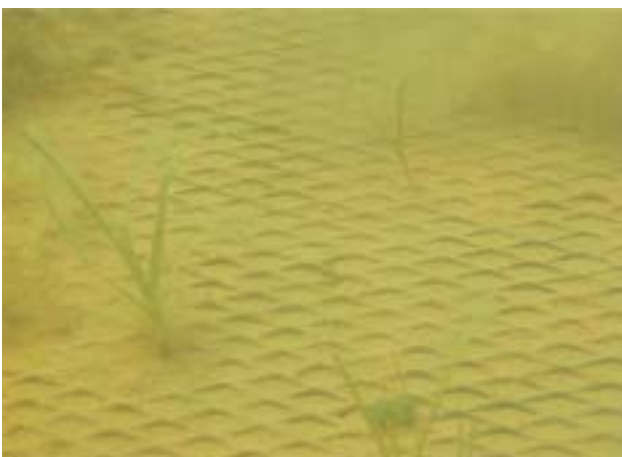


Photo. 4 堆砂状況(櫛木浜 期5月)

堆砂は、設置から1ヶ月経過した3月より認められた(Photo.3)。その後に上部覆い工にシオミドロ等の付着物が現れ、やがて全体を覆うようになったが、設置から2ヶ月経過した4月設置マット上に堆砂が進み、上部覆い工上まで砂が現れるようになると、付着物は次第に消え始め、3ヶ月経過した5月には大半が消失した(Photo.4)。しかし、設置から7ヶ月経過した9月から沖側設置マットで沖側に面した端部より洗掘および保持した漂砂の散逸が始まり、9ヶ月経過した11月時点で本体の大部分が露出、マット下部も4分の1程度の面積が洗掘されていた。一方岸側設置マットでは、洗掘等は生じず、逆に全体が海底面に埋没した。

腐食状況は、設置から5ヶ月経過した7月より上面覆い工および漂砂保持工の一部で腐食・消失が見られ、9ヶ月経過した11月には沖側設置マットで上部工の大部分および漂砂保持工の7割程度が消失していた。その他の部分は長期間残存した。

アマモの出芽・生長およびマット上の堆砂状況に関し、上部覆い工および漂砂保持工に用いたエキスパンドメタルの太さには、顕著な差異は認められなかった。

3.3 返子ヶ浜 期

使用した鋼製マットは、櫛木浜 期と同型であった。ただし上面覆い工および漂砂保持工部のエキスパンドメタルを櫛木浜 期に用いた部材太さの細かい方であるメッシュ長方向30mm、短方向12mm、太さは1.5mm程度のもの(JIS規格XS31)と目合いのやや大きいメッシュ長方向50mm、短方向22mm、太さ2mm程度のもの(JIS規格XS41)とした。

種子は岡山県産多年性、同単年性および徳島県産多年性種子を使用した。播種体は徳島県水産試験場鳴門分場にて製作し、試験現場である東和町まで自動車で移送した。

設置箇所は、当該海域において波浪観測を行った際、アマモ密生区と称した箇所近傍で、濃密な離れ島状アマモ場が過去に形成されていた場所である(Fig.12)。示すように配置は、汀線方向8枚×岸沖方向5枚の計40枚を方形とした。汀線方向には密着させ、岸沖方向は0.5mの間隔を開けた(Fig.23)。

設置作業は、櫛木浜 期と同時期の2001年2月に実施した。

アマモの生長状況は、設置から約3ヶ月経過して5月では、最大株数12株、草丈200mmに生長した鋼製マットもあったが、1枚当たり平均では株数3株であった。これらも5ヶ月経過した7月には半減し、9

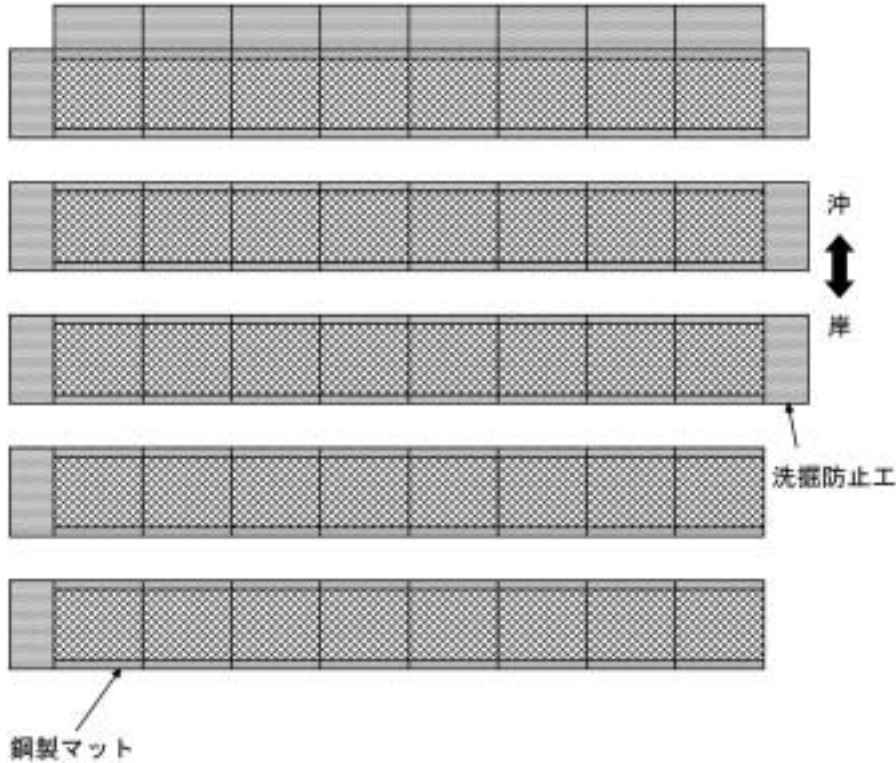


Fig. 23 鋼製マット配置図 (逗子ヶ浜 期)

ヶ月経過した11月にはすべて消失した。

堆砂は認められたが少量であり、上面覆い工に達するほどではなかった。

3.4 逗子ヶ浜 期

逗子ヶ浜 期と同様の2種類および上面覆い工と漂砂保持工を取り除いた計3種類の鋼製マットを用い、翼状堆砂促進工も一部設置した。翼状堆砂促進工は、重量が制限となり、高さが水深の20分の1と模型実験よりさらに低天端な構造となった (Fig.24)。

種子は岡山県産多年性種子および同単年性種子を使用した。

配置はに汀線方向5枚×岸沖方向2枚を設置1セットとし (Fig.25, Photo.5), 逗子ヶ浜 期とほぼ同地点に汀線方向に並べて2セット設置 (東沖マット群), うち1セットには沖側5mに翼状堆砂促進工を設置した (Photo.6)。さらに、約10m岸側に1セット (東岸マット群), また汀線方向西に100m程度離れた地点で、当該海域において波浪観測を行った際アマモ無性区と称した箇所に1セット (西マット群) 設置した。

2002年1月に、播種体を隣接する逗子漁港内の作業小屋にて製作し、流水水路内に保管後、翌日鋼製マットに挟み海域に設置した。

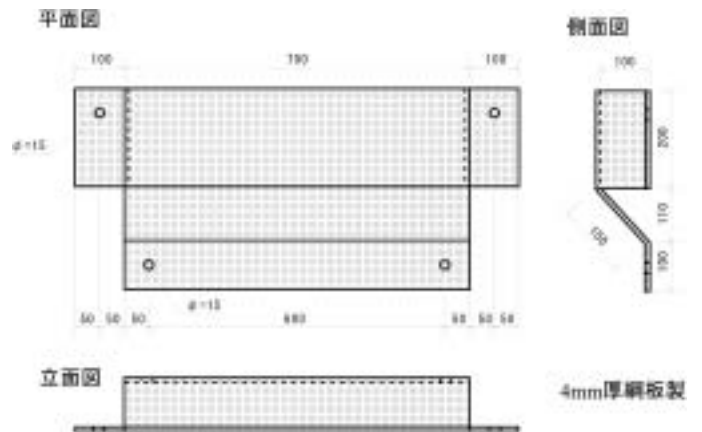


Fig. 24 翼状堆砂促進工構造図 (逗子ヶ浜 期)

鋼製マットごとの株数と最大草丈の経緯を示した (Table.2)

多年性種子を使用した鋼製マットにおけるアマモ生長状況は、東沖マット群が出芽・生長ともに良好であった。もっとも顕著であったのが設置から4ヶ月経過した5月時点で、東沖マット群の堆砂工を設けた上部工エキスパンドメタル部の無いものは、他の東沖マット群の約2倍の密度で繁茂していた。このことを除き、

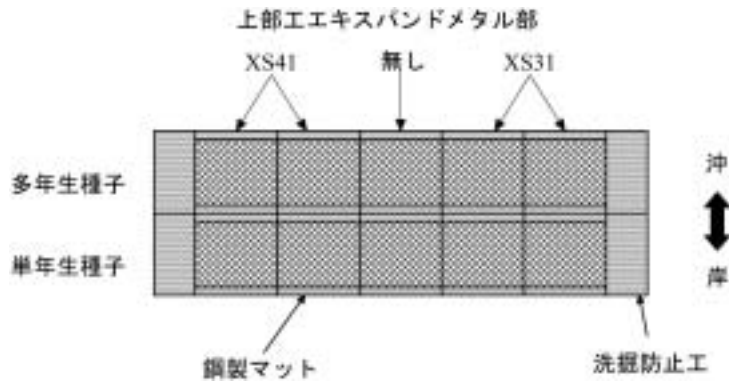


Fig. 25 鋼製マット配置図 (逗子ヶ浜 期)

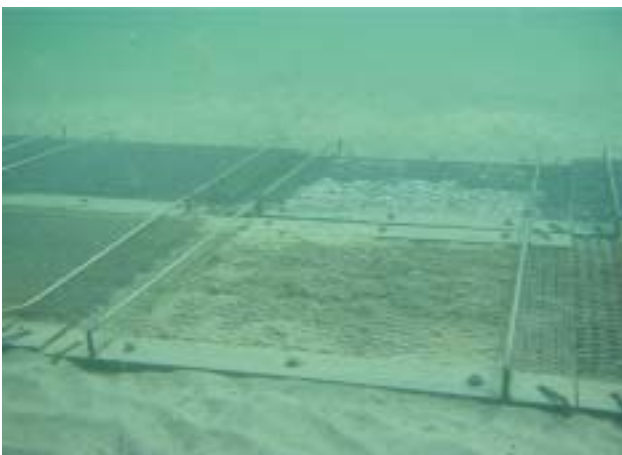


Photo. 5 鋼製マット設置状況 (逗子ヶ浜 期)



Photo. 6 翼状堆砂促進工設置状況 (逗子ヶ浜 期)

堆砂工の有無で傾向に違いは見られなかった。鋼製マット形状の比較では上部エキスパンドメタル部無しがもっとも生長がよく、次にXS41を用いた目合いの粗いものであった。目合いの細かいXS31を上部工部に使用したものは生長状況がやや劣った。設置から6ヶ月経過した7月には、株数はほぼ維持されているが、草丈が短くなった。このとき、葉の先端部は切り取られた、あるいは嚙り採られたと思われるような様子を示した (Photo.7)。1が、堆砂工を有した上部工エキスパンドメタル部の無い鋼製マットで2株、堆砂工の無いものでも1株が長期間維持された。設置から12ヶ月経過した2003年1月には前者で9株に、後者で5株に増え、さらに14ヶ月経過した3月には15株と9株に増えた。その後も若干の株数の減少はあるものの、16ヶ月経過した7月までこのアマモは維持され (Photo.8), 堆砂工有りではさらに長期間残存した。

東岸マット群および西マット群では、設置から1ヶ月経過した2月の出芽期、および2ヶ月経過した3月

の初期生長期には東沖マット群とほぼ同等の生長状況を示したが、3ヶ月経過した4月には草丈において差が認められはじめ、4ヶ月経過した5月には株数が次第に減少し、6ヶ月経過した7月にはすべて消失、以降、アマモの出芽は見られなかった。

単年性種子を使用した鋼製マットでは、多年性種子を使用したものと比較すると、全般に株数は少なく、草丈は大きい。東沖マット群においては、設置から6ヶ月経過した7月に、マット1枚につき1~3本の花枝が形成された (Photo.9)。10ヶ月経過した11月以降、ほとんどのアマモは消失した。

堆砂状況は、アマモの生長が良好であった東沖マット群において、観察期間ほぼすべてを通し双方とも上面覆い工に達するまでは堆砂は見られなかったが、堆砂工の無い方では播種体が露出しているのに対し (Photo.10), 堆砂工を設けた方では播種体は底質に埋没していた (Photo.11)。東岸および西マット群では、3月にはほぼ全体が底質で覆われ、5月には深さ



Photo. 7 草丈の短くなったマット上のアマモ
(逗子ヶ浜 期7月, 多年性種子播種体)



Photo. 10 堆砂状況(逗子ヶ浜 期2月, 東沖堆砂工無し上部工エキスパンドメタル無し)



Photo. 8 マット上で形成した花枝(逗子ヶ浜 期7月, 単年性種子播種体)



Photo. 11 堆砂状況(逗子ヶ浜 期2月, 東沖堆砂工有り上部工エキスパンドメタル無し)



Photo. 9 設置翌年回復したアマモ(逗子ヶ浜 期翌7月, 東沖堆砂工有り上部工エキスパンドメタル無し)



Photo. 12 ハイブリッド型マット

100mm以上埋没した。埋没が進んだ時期と、マット上のアマモが衰退した時期とは一致していた。観察によると、底質に埋没した草体部は海中にあるものと比べ、白色を呈し、かつ細くなっていた。

3.5 逗子ヶ浜 期

使用した鋼製マットは、上部工エキスパンドメタル部の無いもの、目合いの大きいXS41を用いたものおよび木製角材を組み合わせたもの（Photo.12）の3種類とした。

配置は、逗子ヶ浜 期の東沖マット群の岸側に、各マット単体で互い違いになるよう市松状に設置した（Fig.26）。

種子は岡山県産多年性種子を使用した。

播種体には緩効性肥料を全内容物の10%程度加えた。この緩効性肥料とは、陸上工事で芝張り時に用いる肥料で、微量ずつ養分が溶出し、長期間施肥効果が持続するという特徴を持つ。

現地組み立ておよび設置作業は2002年12月に実施した。

アマモ出芽・生長状況の経緯を示した（Table.3）。設置から8ヶ月経過した7月まで、上部工エキスパン

ドメタル部の無いマットで出芽・生長が顕著であり、基本型は逗子ヶ浜 期と同等かやや劣った。ハイブリッドマットは出芽・生長ともに不良であった。この時期特記すべき事項として、表中の2003年7月に「イカ産卵」と記したが、このマット上に形成されたアマモ群落にアオリイカが産卵した（Photo.13）。このため、株数等の計測はできなかった。また、鋼製マット上面覆い工上をアマモの地下茎がエキスパンドメタルにひげ根を絡ませながら伸長していた状況が観察された（Photo.14）。写真は7月調査時の基本型4の上面覆い工部の画像であるが、2株のうち下方がその状況を示していた。また、上方に写っているものは、葉体が切断あるいは噛みちぎられたと思われる状況であった。順調に生長していたアマモ群落であったが、9月以降急速に減衰を始め、10月にはすべて消失した。なお、当該海域において8月に今までにない規模の赤潮が発生していたことを現地聞き取りにより確認した。

堆砂状況は、2月時点では逗子ヶ浜 期よりやや良好であり、上部工エキスパンドメタル部無しマットでは上部播種体保持工上面まで堆砂が進み（Photo.15）、基本形でも一部上面覆い工まで堆砂が見られたものもあった（Photo.16）。しかし4月以降、基本形では保

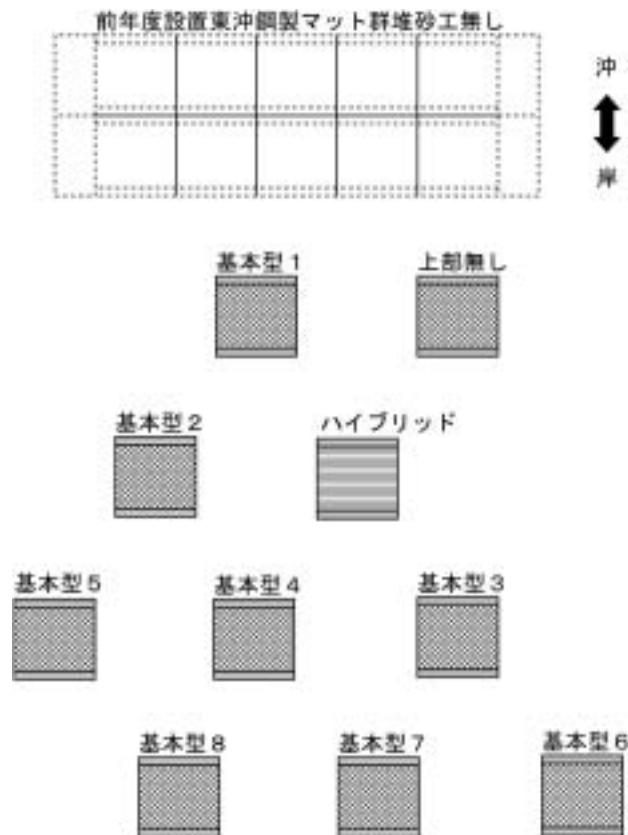


Fig. 26 鋼製マット配置図（逗子ヶ浜 3 期）

Table. 3 鋼製マット上のアマモ出芽・生長状況の経緯（逗子ヶ浜 期）

（単位：株数は株，草丈はmm）

名称	2003/1/20		2003/3/11		2003/4/15		2003/5/20		2003/6/19		2003/7/16		2003/9/18		2003/10/25	
	株数	草丈	株数	草丈	株数	草丈	株数	草丈	株数	草丈	株数	草丈	株数	草丈	株数	草丈
上部無	63	80	260	90	230	400	220	400	245	700	イカ産卵		3	120		
基本 1	3	40	11	90	12	320	11	250	6	350	4	150				
木鋼H			3	100	1	320	6	150	2	200	2	300				
基本 2	1	10	17	75	18	200	17	250	20	250	21	250	2	60		
基本 3	2	20	10	45	13	120	9	200	7	200	5	350				
基本 4	1	50	20	75	18	160	20	200	19	250	17	200				
基本 5			9	70	7	130	5	150	8	250	4	200	1	30		
基本 6			4	50	7	100	4	170	1	150	1	300				
基本 7			7	60	6	200	8	200	7	400	7	350				
基本 8			26	60	26	150	29	200	25	200	27	200	3	70		

注：木鋼Hはハイブリッド型マットを示す



Photo. 13 形成したアマモ群落に生み付けられたアオリイカの卵（逗子ヶ浜 期7月）



Photo. 15 堆砂状況（逗子ヶ浜 期2月，上部工エキスバンドメタル無し）



Photo. 14 上面覆い工を這うアマモ地下茎（逗子ヶ浜 期7月）

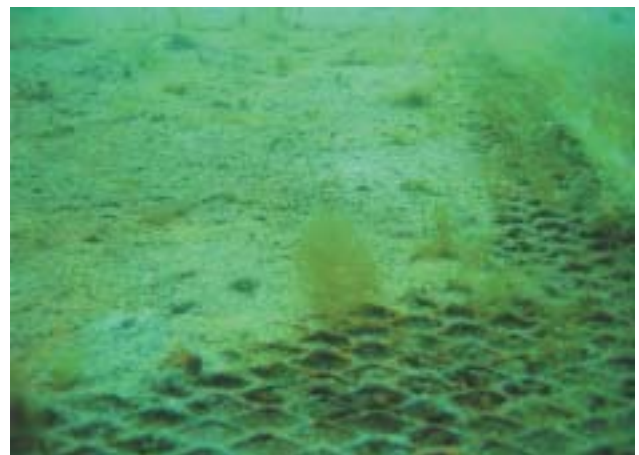


Photo. 16 堆砂状況（逗子ヶ浜 期2月，基本型）

持した漂砂が流失し、上部工が露出していた。ハイブリッドマットでは堆砂は進まなかった。

ハイブリッドマットの木製部分の腐食・崩壊状況は、7月には全体に微少な孔が空き、軽い力をかけると崩壊する状況であった。10月時には全体の10%程度が流失していた。

3.6 鋼製マットの安定性と底質還元化作用

上記試験期間中、鋼製マットに転倒および滑動等は見られず、安定していた。

試験終了後、マットを撤去したが、その際、マット下の底質は黒く変色しており、硫化水素臭を確認した。

考 察

1 発芽条件を良好にする機能に関して

模型実験により、発芽条件として鋼製マットの基本機能に設定した鋼製マット内部への早期の堆砂が確認できた。

実海域実証試験においても、設置から3ヶ月以上の期間、鋼製マット内部に保持した播種体の形状が維持されていることが確認されたことから、鋼製マット外への種子の散逸はほとんど無いが、僅かであったと考えられる。設置から長期間経過した時点では、砂泥層を還元状態に誘導する機能は確認できたが、設置から発芽までの短い期間にこの機能が発揮されるかについては確認できなかった。しかし、鋼製マット内に保持された種子の20%以上が出芽していることから、発芽条件は良好であると考えられる。

2 出芽・生長条件を確保する機能に関して

模型実験において、実験開始直後から認められた鋼製マット内部の堆砂が実験終了時の8時間後まで保持されたことから、捕らえた砂泥の再度の飛散を押さえる機能を確認できた。

実海域実証試験においては、櫛木浜 期でアマモの出芽・生長が認められなかった主因として、上面覆い工および漂砂保持工に生じた付着物にあると考え、櫛木浜 期では以下の改良を行い、良好な結果を得た。

マット厚さを薄くする。

エキスパンドメタルの太さを細くする。

エキスパンドメタルのメッシュをやや細かくする。

漂砂保持工の凸部の数を増やす。

上面覆い工上に構造材を設ける。

および は付着物対策であり、 において付着面

積を小さくするとともに、 においては底層に多い漂砂の摩擦により付着物を除去する目的をもっている。

および は漂砂保持機能を高めるためのものである。ただし は、後述するように、鋼製マット単体で積み重ねや裏返しての組み立てが可能となるようにし、施工性を向上させることが目的である。

逗子ヶ浜 期でアマモの出芽・生長が不良であった要因としては、

移送時の振動・摩擦による種子の劣化。

当該海域は波高が比較的小さく、底層漂砂移動が少ないため、鋼製マットの機能が堆砂発揮されなかった。

上記に加え大規模に集中して設置したので、漂砂が鋼製マット群全体に行き渡らなかった。

鋼製マット設置時期が当該海域におけるアマモ出芽にとって不適であった。

等が考えられたことから、現地組み立て場所の移動、翼上堆砂促進工の設置、鋼製マットの小規模分散設置、設置時期の変更等を工夫し、逗子ヶ浜 期では良好な結果が得られた。

逗子ヶ浜 期において基本型の出芽・生長状況が期よりやや劣った要因としては、上部工エキスパンドメタル部を目の粗いXS41としたことから、保持した漂砂が維持されなかったことにあると考えられる。XS41については、逗子ヶ浜 期の東沖マット群において、目の細かいXS31とほぼ同等かやや良好な結果が得られたことから採用したが、単独での機能ではなく、翼上堆砂促進工と組み合わせでの効果であった。

3 アマモ成体を保持する機能に関して

櫛木浜 期では、単年性種子を使用していたことから、形成されたアマモ群落が秋期に消失したことは、アマモの生態的な特性による現象である。逗子ヶ浜 期及び 期に形成されたアマモ群落の維持が難しかった要因は、栄養不足や赤潮等の水質の影響、草食魚による食害(寺脇ら, 2002)等の海域特性にも原因があると考えられる。

しかしながら、鋼製マットの基本機能として設定した播種体保持工にアマモの地下茎が絡む状況も確認できなかった。播種体保持工にアマモの地下茎が絡むためには、出芽した後、上方向への伸長だけではなく、地下茎の横方向への伸長が必要である。出芽して4~5ヶ月後には地下茎の横方向への伸長が行われること、および上面覆い工と漂砂保持工がこれを阻害していることは、逗子ヶ浜 期において上面覆い工上をアマモ地下茎が伸長してた結果が示している。また、逗子ヶ浜 期の東沖マット群において上部工エキスパン

ドメタル部の無いものが比較的残存状態が良好であったことから推測される。

この機能が発揮されるためには、上面覆い工および堆砂保持工がさらに早期に腐食・消失する必要があると考える。具体的な対応策としては、さらに細い部材を用いることや、化学的あるいは時間的手法により部材の腐食を進ませることが考えられるが、漂砂保持機能とのかねあい等もあり、今後さらに詳細な検討が必要である。

4 施行を円滑にする機能に関して

櫛木浜 期の施工性の悪さの反省に基づく櫛木浜期での構造工の改良により、施工性は飛躍的に向上した。海域設置作業は、上部構造工の綱棒部分を持ち手とすることで、積み込み作業も容易であった。船上においても無造作に積み重ねられることで、作業スペースに余裕ができた。海中への投入は上部構造工綱棒部にロープを通して1枚ずつ海中に投入するが、マットを裏返し、上部構造工綱棒部をソリ代わりにして舷側を滑らせるように投入することで、作業性の向上と船舶の破損防止に大いに役立った。

5 適地判定基準に関して

鋼製マットの基本機能が漂砂量に左右されることを考えると、適地判定基準としてシールズ数を用いることが適当であろう。既報（森口ら、1999）より、櫛木浜 期沖側設置位置付近では最大シールズ数として1997年1月の0.27、逗子ヶ浜 期東沖設置位置で1998年1月の0.23、西設置位置で0.12が示される。ただし、櫛木浜においては、鋼製マット設置作業は最大シールズ数が観測された月以降の2月に行っている。また瀬戸内海北向き海岸の風浪発生特性として、冬期風浪期だけではなく秋期台風期に同等の波浪が発生することが報告されており（高谷ら、2003）、櫛木浜 期実証試験が秋期台風期前後に形成アマモ場が消失していることを勘案すると、前述の改良がなされたとしても、上記0.27を採用するには若干疑問が残る。また逗子ヶ浜東沖設置位置でのシールズ数0.23は濃密で大規模なアマモ場が形成されていた状況下での数値であり、アマモ群落消失後の試験実施時期においては波浪環境がほぼ同等である西設置位置と同程度の0.12に近い値となっていると考えられる。以上から、基本型マットはシールズ数0.2前後の海域が適地であり、0.15を下回るようであれば上部工エキスパンドメタル部の無い構造を考慮に入れるのが適当であろう。ただし、櫛木浜期岸側設置位置、あるいは逗子ヶ浜 期東岸および西設置位置のように、季節的に局所的な堆砂の著しくな

るような箇所には適さないことから、実施にあたっては事前に数種の鋼製マットを単体で広域に分散設置することにより、各地点の適正評価を行うなど、十分な事前調査と評価が必要であろう。

6 まとめ

鋼製マットを用いたアマモ場造成工法は、最終的に目的とした広域かつ濃密なアマモ群落の長期間の維持は果たせなかったが、改良の方向性も示され、実現の可能性は高いと考えられる。

土木工学的には評価の低い翼状堆砂促進工のような低天端の構造物について、水産工学的な利用価値が見いだされた意義は大きい。ただし、模型実験時のように漂砂発生量が大きく鋼製マットが埋没する状況になっては、逗子ヶ浜 期の西設置マット群のようにアマモの生長を阻害してしまうことが予測される。使用にあたっては規模や構造に注意を要する。また、低天端構造物を用いた漂砂制御や海底面地形制御は、小規模あるいは微細な環境制御を要する水産工学的手法として、さらに広範囲な活用が期待される。

おわりに

最後に、造成試験実施海域を管轄する徳島県北灘漁協および山口県東和町漁協および岩国市漁協、特に東和町漁協所属の伊藤和宏氏には用船をお願いする一方で、アマモ場の消長や生息生物等に関する多様な情報、研究の方向性の示唆等を頂いている。ここに記して謝意を表す。

本研究は水産庁所管沿岸漁場整備開発調査の一部として実施した。

なお、鋼製マットをアマモ場造成工法として特許申請したが、申請に先立ち本報で述べた実証試験をしたことを公然実施にあたるとして拒絶されたことを、今後の参考のため付記しておく。

参考文献

- 川崎保夫、飯塚貞二、後藤 弘、寺脇利信、渡辺康憲、菊池弘太郎、1988：アマモ場造成手法に関する研究．電力中央研究所報告，U14，pp.1-231.
- 植木範行、光永演允、1996：数種の基盤材を用いたアマモの播種方法の開発．岡山水試報，11，pp.23-26.
- 團 昭紀、森口朗彦、三橋公夫、寺脇利信、1998a：鳴門地先におけるアマモ場と底質および波浪との関係．水産工学，Vo.34，pp.299-304.

- 團 昭紀, 和泉安洋, 森 啓介, 広澤 晃, 寺脇利信, 1998b: 底質安定化マットの播種によるアマモの繁茂. 水産工学, 35, pp.37-42.
- 森口朗彦, 高木儀昌, 仲宗根琢磨, 吉川浩二, 團 昭紀, 和泉安洋, 1999: 分布特性の異なる2つのアマモ場における物理環境現地観測. 水工研技報21, pp.1-12.
- 平岡喜代典, 高橋和徳, 中原敏雄, 寺脇利信, 岡田光正, 2000: 移植実験によるアマモの生育制限要因の検討. 環境科学, 13, pp.391-396.
- 玉置 仁, 寺脇利信, 吉田吾郎, 岡田光正, 2001: アマモの天然群落と移植群落における季節消長の比較. 藻類, 49, pp.195-197.
- 和泉安洋, 広沢 晃, 團 昭紀, 森口朗彦, 寺脇利信, 2002: 底質安定化マットによる4年間のアマモの生長と成熟. 水産工学, 39, pp.139-143.
- 寺脇利信, 玉置仁, 西村真樹, 吉川浩二, 吉田吾郎, 2002: 広島湾におけるアマモ草体中の炭素および窒素総量. 水産総合研究センター研究報告, 4, pp.25-32.
- 島谷学, 河本武, 中瀬浩太, 月館真理雄, 2003: アマモ実生株の生残条件に関する研究. 海岸工学論文集, 50, pp.1096-1100.
- 高谷智恵子, 斉藤 博, 玉置 仁, 森口朗彦, 吉田吾郎, 寺脇利信, 2003: 広島湾地先における風浪環境の特徴. 日本水産工学会学術講演会論文集, pp.151-152.
- 森口朗彦, 高木儀昌, 寺脇利信, 2004a: 離れ島状に形成されたアマモ場の経年変化及び季節消長(日本藻類学会第28回大会講演要旨). 藻類, 52(1), pp.50.
- 森口朗彦, 高木儀昌, 寺脇利信, 2004b: 離れ島状に形成されたアマモ場の消長と波浪環境, 海洋開発論文集, Vol.20, pp.971~976
- 森口朗彦, 高木儀昌, 寺脇利信, 小見山秀樹, 團 昭紀, 棚田教生, 2004c: アマモの植生と底質組成. 平成16年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp.115~116
- 棚田教生, 和泉安洋, 團 昭紀, 広澤 晃, 森口朗彦, 寺脇利信, 2005: 冬季波浪条件の比較的厳しい海域におけるガーゼ・礫製マットによるアマモ繁茂への効果と限界. 水産工学, 42, pp.129-134.