

現地アマモ場造成試験と適地評価に関する研究

金 澤 剛*・森 鐘 一**

砂泥質の沿岸域に存在するアマモ場を人工的に復元する試みの一つとして本研究では、アマモの種を植え付けた播種シートを海底地盤に設置する「播種シート工法」を開発し、兵庫県明石市東播海岸において比較的大規模な現地試験を実施した。そして定期的な追跡調査により、本工法によって生長したアマモが越年して2年目にも群落を維持したことを確認し、本工法の有効性を明らかにした。また、波浪および海底地形の継続的観測結果とアマモの生長を比較し、さらに三次元海浜変化計算を用いることでアマモ場造成の確度を向上させるための適地評価ツールを構築し、現地への適用を試みた。

1. はじめに

砂泥質の沿岸域に群落を形成するアマモ場は、魚卵稚子の生育場となるとともに、広く自然環境および生態系の保全に寄与してきた。更には水質浄化や底質の安定化といった沿岸の環境形成の面でも極めて重要であると指摘されている。しかしながら、高度経済成長期以前から沿岸開発が進められた結果、直接的には埋立によって、また間接的には水質悪化によって、現在ではアマモ場がかなり減少してしまっている。そこで、失われたアマモ場を人為的に再生することにより、かつての自然生態系を回復することが望まれ、アマモ場造成法に関する様々な研究が進められてきた（例えば、(財)港湾空間高度化センター港湾・海域環境研究所, 1998）。その内の一つとして、著者らは、アマモの種子を取り付けた「播種シート」を海底地盤に展張、設置して、アマモを発芽・生育させる「播種シートによるアマモ場造成法」を提案している（例えば、芳田ら, 1998）。

一方、効果的なアマモ場造成を実施する為には、アマモ場の外力に対する成立条件を明らかにし、造成適地を選定する必要がある。これに関する研究としては、丸山ら（1987）はアマモ場の沖側の生育限界を光の強さ、岸側を砂移動に影響する外力の強さとし、岸側の生育限界を Shields 数を指標として評価している。また、中瀬ら（1992, 1993）もアマモ場の平面的な分布範囲を Shields 数で評価し、島谷ら（2002）は造成地点での流れの検討により浮泥の滞留を避ける必要性を指摘している。

本研究では明石市東播海岸で実施した「播種シート工法」を用いた比較的大規模な実海域試験について、設置後1年半におよぶアマモの発芽・生育数の定期的な追跡調査により、本アマモ場造成工法の有効性を明らかにした。また、波浪および海底地形の継続的観測結果とアマモの生長を比較することにより、アマモ株数の増減と地形変化の関係を検討した。さらに、これらの知見に基づき、アマモ場造成の確度を向上させるために事前に適地

評価を行うための数値計算による評価ツールを構築し、現地への適用を試みたものである。

2. 播種シートによるアマモ場造成法

播種シートによるアマモ場造成法（芳田ら, 1998）は、図-1に示すように、アマモ種子を付着させたロール状のシートを起重機船で吊り上げ、播種シートの端部を海底に固定した後、一気に海底に展張、敷設する工法である。この工法はアマモ場造成の確度が高く、かつダイバーの水中作業を少なくして造成コストを大幅に低減することが可能である。また、播種シートは、アマモの種子を適切な播種密度で特定区域の海底に効率よく固定するために考案されたものである。播種シートの素材には環境に更なる負荷をかけないよう、全て分解性・溶解性のものを用いている。すなわち、アマモ種子をヤシ繊維から成るヤシマットと生分解性不織布で挟み、ヤシマットが海底面に接するように設置して、不織布等の浮き上がり防止のために金網を被せたものである。

3. 実海域試験

(1) 試験海域

播種シートによるアマモ場造成実海域試験は、図-2に示す明石市の東播海岸谷八木地区前面海域において

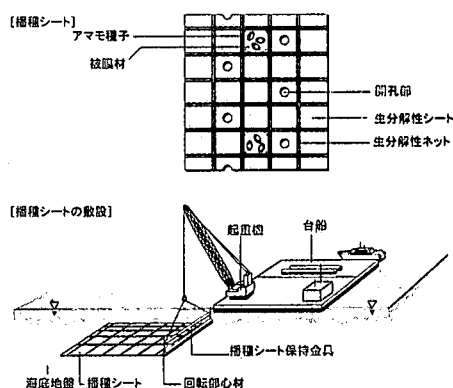


図-1 播種シートによるアマモ場造成法

2001 年 11 月から実施している。現地は 2 基の突堤に挟まれたポケットビーチ状であり、海底勾配は水深-1.5 m 以浅が約 1/7、それ以深は約 1/50 である。水深-3 m 付近の底質の中央粒径は 0.3 mm 程度であった。

宇多 (1997) は当海岸の地形変化について述べている。それによれば、当海岸は養浜がなされ、養浜直後の 1989 年 10 月から 6 ヶ月後の 1990 年 3 月の間に、当初海岸護岸と平行であった汀線が西側で後退、東側で前進し、それ以後安定した形状を保っている。また、汀線変化にともなって、水深-1.5 m 以浅の等深線がほぼ平行に移動したことが示されている。宇多 (1997) が示す地形が安定した 1990 年 3 月の等深線図と今回の実海域試験に先立ち実施した浅深測量結果がほぼ同じであったことから、当海域は経年的に安定した形状を保っていると判断した。

(2) 播種シートの敷設

播種シートの敷設については、芳田 (2002) が報告している。敷設した播種シートは、離岸堤と突堤の開口部で水深が-2.5~-3.0 m の地点に 10 m×30 m (300 m²) のシートが 2 枚と、波浪等外力の影響を検討するため、離岸堤端部背後に敷設した 5 m×5 m (25 m²) のシート 1 枚の計 3 枚である。なお、離岸堤と突堤の開口部には自生のアマモがごく僅かに点生しているがシート敷設場所には存在しない。離岸堤背後には自生のアマモ群落があるが、シート敷設場所は群落の脇でアマモは自生していない。

4. 現地計測

(1) 播種シートによるアマモの発芽・生育数

播種シートを設置して約 3 ヶ月後の 2002 年 2 月から約 15 ヶ月後の 2003 年 2 月まで、6 回にわたって播種シート内のアマモの発芽・生育数を調査した。調査方法は、10 m×30 m のシートは幅 1 m、長さ 30 m の調査区域を 4 列、5 m×5 m のシートは幅 0.5 m、長さ 5 m の調査区域を 3 列設け、各調査区域内の発芽・生育数をダイバーが計測した。シート敷設面積当たりに換算した、各シートにおけるアマモの発芽・生育数を表-1 に示す。なお、各シートへの播種密度は 1 m² 当たり 300 粒である。

波浪が幾分遮蔽される離岸堤端部背面に敷設した播種シートの発芽・生育数は、幼体期の 2002 年 2 月では 173 本であったが、生長が盛んな初夏の 2002 年 6 月には地下茎の分枝により 860 本に増加し、目標としていた 1 m² 当たり 30 本の株密度を達成した。これらのアマモ株は夏から初冬にかけての衰退期に株数を減少させたが、シート敷設から約 15 ヶ月後の 2003 年 2 月における株数は 917 本に増大した。この時のアマモ株は写真-1 に示すように小さなパッチ状の群落が点在して分布しており、今後、大規模な群落へと発展することが期待される。

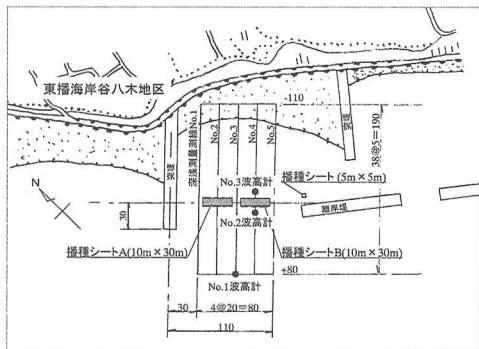


図-2 現地試験概要図

表-1 アマモの発芽・生育数

播種シート	敷設位置	離岸堤と突堤の開口部		離岸堤背後
		西側 (A)	東側 (B)	
発芽・生育 本数 (本)	敷設面積	300 m ²	300 m ²	25 m ²
	2002.2.21	55	115	173
	2002.4.5	31	32	179
	2002.6.25	68	75	860
	2002.8.20	70	43	750
	2002.11.29	20	5	417
	2003.2.26	43	8	917



写真-1 発芽・生育したアマモ (約 15 ヶ月後)

一方、波浪が直接入射してくる突堤と離岸堤の開口部に敷設した播種シートでは、離岸堤背面のシートに比較して発芽・生育数がかなり少ない。また、2002 年 2 月から 4 月の間に大幅な発芽・生育数の減耗が見られる。このことは、現在、波の影響が強くてアマモが全く或いはほとんど自生していない海域でアマモ場造成を実施する場合、播種シート工法によってアマモの種子を海底に固定するだけでは確度が低いことを示している。

(2) 来襲波浪

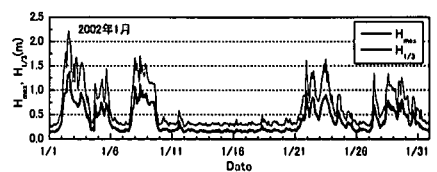
播種シート敷設後の 2001 年 12 月から 2002 年 6 月までの約半年間に渡って、図-2 に示す位置に海底設置型超音波式波高計 3 台を現地に設置し、来襲波浪を計測した。突堤と離岸堤の開口部に敷設した播種シートの前面

沖側で計測した 2002 年 1 月の有義波高と有義波周期の時系列図を図-3 に示す。図-3 によれば播種シート敷設位置では、アマモがまだ小さな幼体である冬期に、有義波高が 1.0 m 程度、有義波周期 5 s 程度の高波浪が数日継続して来襲している。一方、静穏時の有義波高は 0.3 m 程度、有義波周期 3 s 程度である。次に、計測期間中の月別の最大有義波諸元を表-2 に示す。当海岸では冬から春にかけて、徐々に来襲波の波高が小さくなる傾向にある。なお、表-1 に示した 2002 年 2 月 21 日から 4 月 5 日の間のアマモ株の減耗に関して、この期間の最大来襲波は有義波高 0.79 m、有義波周期 5.0 s であり、継続時間は 1 日程度と比較的短かった。すなわち、当海域では有義波高 0.8 m 程度の比較的良好に来襲する波浪が幼体期のアマモの流失に影響していると考えられる。したがって、アマモ場造成の確度を高めるためには事前の適地評価が必要で、その時の検討対象波浪には年間最大波や年数回来襲波といった比較的大きな波高だけでなく、対象水深に最も影響を与える波浪諸元をも対象とする必要があると考える。なお、1 月の高波浪をアマモが耐えた理由として、アマモの生長度合いやヤシマツの分解が進んでいなかったことなどが考えられる。

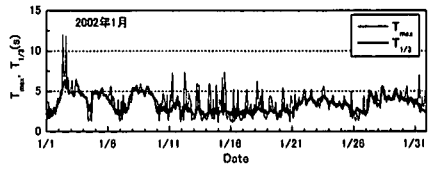
(3) 海底地形変化

播種シート敷設前の 2001 年 8 月および敷設時の 2001 年 11 月から 2002 年 11 月までの間は 1~3 ヶ月おきに、図-2 に示す 20 m 間隔の 5 本の岸沖方向測線を設けて深浅測量を実施し、地形変化を検討した。突堤と離岸堤の開口部に敷設した 2 枚の播種シートの中央を通る測線 No. 2 および No. 4 の海底断面形状を図-4 に示す。測線 No. 2 の 2002 年 2 月のように、断面形状が短期的に大きく変化した月もあるが、全体的に見れば両測線ともほぼ安定した断面形状を示しており、経年的に安定した海岸という評価は妥当といえる。しかしながら、冬期風浪によると考えられる短期的な変動が存在し、それがアマモの発芽・生育数に影響したと考える。すなわち、2002 年 2 月において西側のシート A 敷設位置では平均的な断面形状より 0.5 m 程度の侵食が生じているのに対し、東側のシート B 敷設位置では逆に若干の堆積傾向にある。また、翌 3 月にはシート A 敷設位置では平均的な断面形状に戻りつつあるのに対し、シート B 敷設位置では侵食に転じている。こうした隣り合う 2 枚の播種シート敷設位置における地形変化の差異が、アマモの発芽・生育数の変化、すなわち、2 月の生育数はシート A が少なくシート B が多く、4 月の時点でシート A よりシート B での株の減耗が激しいといった変化を説明している。

以上のことより、アマモ場造成においては対象海域の長期的な地形変化に加え、短期的な変動についても考慮することが重要である。



(a) 波高

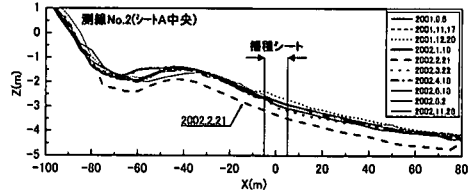


(b) 周期

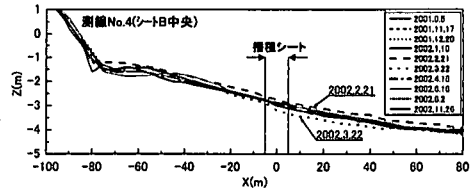
図-3 波浪観測結果 (2002 年 1 月)

表-2 月別最大有義波諸元

観測年月	$(H_{1/3})_{\max}$ (m)	$(T_{1/3})_{\max}$ (s)	wave-direction
2001.12	1.04	4.7	WSW
2002.1	1.37	5.4	SW
2002.2	0.96	4.6	SW
2002.3	0.79	5.0	SW
2002.4	0.67	5.0	SSW
2002.5	0.43	3.4	SW
2002.6	0.74	3.3	SW



(a) 測線 No. 2 (シート A 中央)



(b) 測線 No. 4 (シート B 中央)

図-4 海底断面形状の変化

5. 適地評価

(1) 評価手法

東播海岸谷八木地区における播種シートの敷設ならびにその後の追跡調査や現地観測により、アマモの発芽・生育および群落の維持に、波浪とそれによる地形変化が

大きな影響をおよぼしていることが確認できた。そこで、これら外力に対するアマモ場造成の適地評価を試みた。評価手法としては既往の研究（例えば、中瀬ら、1992）にならない、三次元海浜変形計算による地形変化速度および底質に作用する力と底質粒子の自重による抵抗力の比である Shields 数 Ψ を採用した。

三次元海浜変形計算における平面波浪場の計算は、高山ら（1991）の砕波を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた。また、海浜流場の計算には、平面波浪場の計算結果から radiation stress を外力として、線流量に関する運動方程式および連続式を連立させた鈴木ら（1994）の方法を使用した。地形変化の計算には、渡辺ら（1984）の局所漂砂量モデルと漂砂の連続式を用いた。Shields 数は、島谷ら（2002）にならない田中・Sana（1996）の算定方法で求めた波・流れ共存場での摩擦係数を用いて評価した。

解析対象波浪は現地観測結果から、年数回来襲波相当として $H_{1/3}=1.4\text{ m}$, $T_{1/3}=6.0\text{ s}$ 、波向き SW と、アマモ株の減耗に影響したと考えられる $H_{1/3}=0.8\text{ m}$, $T_{1/3}=5.0\text{ s}$ 、波向き SW の 2 波浪とした。解析対象領域の水深分布（平均潮位 0.7 m を含む）を図-5 に示す。

（2） Shields 数による適地評価

波浪場および海浜流場の計算結果をもとに算定した Shields 数の平面分布を図-6 に示す。なお、底質粒径は現地調査結果である $d_{50}=0.3\text{ mm}$ を使用した。図中、ハッチを掛けた領域は、中瀬ら（1992, 1993）がアマモの分布範囲として示した Shields 数が 0.5 以下の領域である。また、図中の黒く塗り潰した領域は、おおよその播種シートの敷設位置を示す。

当海域でアマモが多く自生している領域は離岸堤の背後で突堤との間の領域であり、この領域の Shields 数は、来襲波浪によらず 0.2 以下であった。したがって、この海域では Shields 数が常に 0.2 以下であれば、アマモ群落が経年的に存在し得ると考えられる。一方、アマモの発芽・生育数が期待値に達した $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ の播種シートを敷設した離岸堤端部背面での Shields 数は 0.5 前後とやや大きい。したがって、自然にはアマモが安定して発芽・生育できなかったのが、播種シートにより効果的に種子を固定したため、小さいながらもパッチ状の群落にまで生長できたと考える。しかしながら、離岸堤と突堤の開口部における播種シート敷設位置付近での Shields 数は $H_{1/3}=0.8\text{ m}$ の場合は 2.0 以上、 $H_{1/3}=1.4\text{ m}$ の場合は 0.8 程度とどちらの波浪条件の場合もかなり大きい。したがって、自生のアマモもなく、播種シートによっても発芽・生育数が低く、なおかつ、生長途中での減耗が激しいことが説明できる。これより、アマモに対する環境が現状では明らかに厳しいところでは、アマモのための

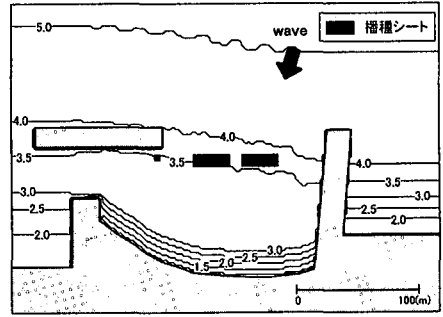
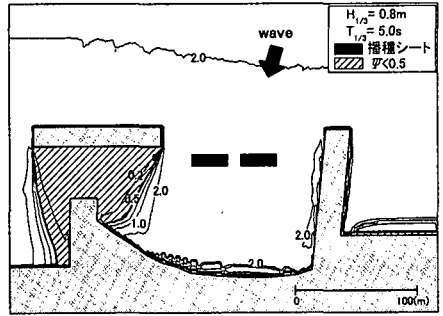
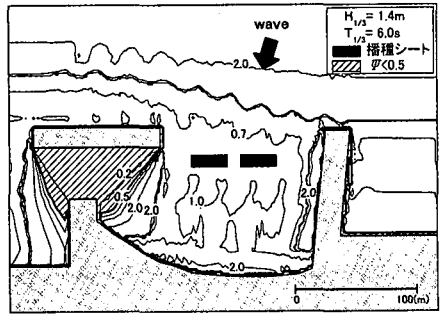


図-5 計算領域



(a) $H_{1/3}=0.8\text{ m}$, $T_{1/3}=5.0\text{ s}$



(b) $H_{1/3}=1.4\text{ m}$, $T_{1/3}=6.0\text{ s}$

図-6 Shields 数の平面分布

環境緩和が必要である。そして、現在の環境や環境緩和の効果は Shields 数で評価が可能である。

（3） 地形変化速度による適地評価

有義波高 0.8 m 有義波周期 5.0 s の波を対象に、波浪場および海浜流場の計算結果に基づいて算定した 1 時間当たりの地形変化量、すなわち地形変化速度の分布を図-7 に示す。図中、ハッチを掛けた領域は侵食領域を表す。離岸堤背後のアマモが自生している領域には侵食領域は見られない。一方、離岸堤と突堤の開口部に敷設した播種シート付近は、侵食領域と堆積領域が混在し、その地形変化速度は 1 時間当たり ± 数 cm のオーダーである。アマモが根を張る海底面からの深さは 10 cm 程度の

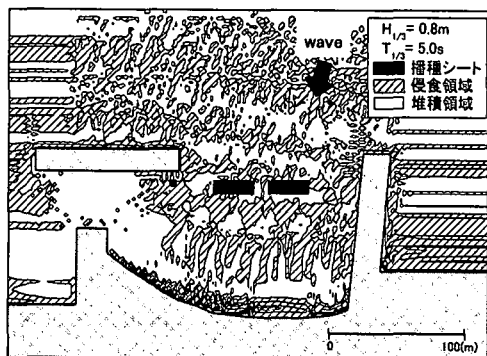


図-7 地形変化の計算結果

ため、高波浪の継続時間を考慮すれば、侵食領域においてはアマモ株が流失するほどの侵食量に達する可能性があり、地形変化速度も適地評価の指標となりうる。しかしながら、現在のところ予測精度の面からも定量的な評価は難しく、侵食領域の分布や地形変化速度の大小といった定性的な評価として、Shields 数と合わせて使用するのが実用的である。なお、図-7 では、離岸堤端部背面も侵食領域となっており、使用した三次元海浜変形計算法の改良や、各種係数の設定が今後の課題である。

6. ま と め

本研究では、明石市東播海岸におけるアマモ場造成試験と現地計測、数値計算により、播種シート工法の有効性を明らかにするとともに、アマモ場造成のための適地評価ツールを構築した。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 「播種シート工法」により発芽したアマモは、越年して群落を維持しており、本工法の有効性が確認できた。
- 2) 三次元海浜変化計算により、Shields 数と地形変化速度によるアマモ場の適地評価を試みた。現地のアマモが自生している領域において、Shields 数による生育適地の評価は既往の研究結果と同じ傾向を示した。
- 3) Shields 数が 0.5 前後とアマモにはやや厳しい環境の離岸堤端部背面に敷設した播種シートでは、アマモの生育数が期待値を越えた。多少生育条件が厳しい場所でのアマモ場造成の可能性を本工法は示した。
- 4) 離岸堤と突堤の開口部に敷設した播種シートでは、海底地形の一時的な侵食がアマモの発芽・生育に影響

し、生育数が期待値に達しなかった。この領域の Shields 数は 0.5 よりかなり大きな値を示した。

- 5) アマモ場造成において、適切な波浪条件を用いた事前の適地の評価が重要である。外力条件が厳しいと判断された場所では、外力を緩和させるための対策と播種シートを組み合わせることで、アマモ場造成の確度の向上が図れると考える。

最後に、播種シートによるアマモ場造成法は(財)国土技術研究センターの 2000 年および 2001 年研究開発助成を受けて、三重大学・前川行幸教授、兵庫県立水産試験場(現水産技術センター)の指導のもと、東洋水研(株)、(株)田中、古河電気工業(株)および前田工繊(株)の協力を得て、東洋建設(株)とモリエコロジー(株)が共同で開発していることを付記する。また、海浜変形計算に関して協力頂いたニシキコンサルタント(株)に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442 p.
- エコポート(海域)技術 WG 編 (1998): 港湾構造物と海藻類の共生マニュアル, (財)港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所, 98 p.
- 島谷 学・中瀬浩太・岩本裕之・中山哲殿・月舘真理雄・星野富士・内山雄介・澁岡和夫 (2002): 興津海岸におけるアマモ分布条件について, 海工論文集, 第 49 巻, pp. 1161-1165.
- 鈴木康正・森川高徳・平石哲也・望月徳雄 (1994): 浅海域における波浪変形計算法の拡張, 港湾技研資料, No. 767, 35 p.
- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 碎波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, 第 30 巻, 第 1 号, pp. 21-67.
- 田中 仁・A. Sana (1996): 交差する波と流れによる抵抗則の検討, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 273-277.
- 中瀬浩太・田中裕一・檜山博昭 (1992): 海浜変形予測手法を用いたアマモ場成立条件に関する研究, 海工論文集, 第 39 巻, pp. 1006-1010.
- 中瀬浩太・田中裕一 (1993): 海浜変形予測手法によるアマモ場成立条件の現地への適用, 海工論文集, 第 40 巻, pp. 1061-1065.
- 丸山康樹・五十嵐由雄・石川雄介 (1987): アマモ場適地選定手法—岸側の砂移動限界—, 第 34 回海研論文集, pp. 227-231.
- 芳田利春・田中裕作・寺田美香里・熊川四郎・森 鐘一 (1998): 播種シートによるアマモ場造成に関する研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, CS-103, pp. 204-205.
- 芳田利春 (2002): 「播種シートによるアマモ場造成法」の開発, マリンボイス 21, Vol.225, pp. 14-16.
- 渡辺 晃・丸山康樹・沼水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第 31 回海研論文集, pp. 406-410.