



Title	アマモ場造成の実用に関する研究
Author(s)	金澤, 剛
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2324
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

アマモ場造成の実用に関する研究

平成 23 年

金 澤 剛

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 論文の構成	2
参考文献	4
第2章 アマモ場の特性	5
2.1 概説	5
2.2 アマモの生活史	7
2.3 アマモ場の成立条件	8
2.4 アマモ場の現状	10
2.5 大阪湾におけるアマモ場の変遷	12
2.5.1 はじめに	12
2.5.2 調査資料および方法	13
2.5.3 海岸線の変遷	14
2.5.4 アマモ場の変遷	17
2.5.5 大阪湾におけるアマモ場造成の方向性	22
2.6 まとめ	24
参考文献	25
第3章 アマモ場造成法の現地適用性の検証	27
3.1 概説	27
3.2 アマモ場造成法	28
3.3 播種シートによるアマモ場造成法	31
3.4 アマモ種子の養生・保存	33
3.4.1 既往の方法と課題	33
3.4.2 アマモ花枝と花穂の採取	35
3.4.3 アマモ種子の養生法の検討	37
3.4.4 アマモ種子の保存法の検討	50
3.4.5 アマモ種子の養生・保存法のまとめ	62
3.5 播種シートによる大規模アマモ場造成試験	63
3.5.1 試験海域	63
3.5.2 播種シートの配置	66
3.5.3 播種シートの製作	67

3.5.4	播種シートの敷設	69
3.6	播種シートによるアマモの発芽・生育および藻場の永続性	71
3.6.1	アマモの発芽・生育数の変化	71
3.6.2	造成初期における来襲波浪の影響	79
3.6.3	造成初期における海底地形変化の影響	83
3.6.4	アマモ場の経年変化における外力の影響	85
3.7	まとめ	87
	参考文献	89
第 4 章	アマモ場の造成適地評価手法の開発	91
4.1	概説	91
4.2	造成適地の評価手法	93
4.2.1	評価手法の構成	93
4.2.2	平面波浪場の計算	94
4.2.3	海浜流場の計算	98
4.2.4	地形変化の計算	101
4.2.5	シールズ数の計算	107
4.3	東播海岸における検証	108
4.3.1	計算条件	108
4.3.2	計算結果	111
4.3.3	アマモ場造成の適地評価	119
4.4	まとめ	122
	参考文献	124
第 5 章	藻場消失海域におけるアマモ場再生の試み	126
5.1	概説	126
5.2	りんくうタウン海域でのアマモ場再生	127
5.2.1	試験海域の概要	127
5.2.2	試験海域の事前評価	129
5.2.3	アマモ場再生試験	138
5.3	阪南 2 区人工干潟でのアマモ場創出	145
5.3.1	実施海域の概要	145
5.3.2	アマモ場造成実験	147
5.4	アマモ場の再生に関する一考察	158
5.5	まとめ	159
	参考文献	161

第 6 章 結論 163

謝辭 169

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

アマモ(*Zostera marina* L.)は、沿岸の砂泥域に分布する海草、すなわち、陸上の植物と同様に維管束があり、根・茎・葉の三つの器官の分化が見られ、花をつけ種子を作る顕花植物(種子植物)である。このアマモが形成した群落をアマモ場と呼び、現在では生物の共存機能をはじめ多様な機能を持ち、水産上の有用性も含めて広く自然環境および生態系の保全に極めて重要な役割を果たしていることが明らかとされている。その一方で、高度経済成長期以前からの沿岸開発などに起因してアマモ場はその面積を減じてきており、アマモ場の再生が求められてきた。

アマモ場を再生する試みは1960年代頃から水産系の試験研究機関を中心に実施され、その後、主として瀬戸内海に面した自治体による単独事業や水産庁の補助事業により大規模なアマモ場再生や修復事業が実施され、そこでの知見は2002年に(社)マリノフォーラム21から「アマモ場造成技術指針」として発刊され(水産庁・(社)マリノフォーラム21)、さらには2007年に水産庁・(社)マリノフォーラム21から「アマモ類の自然再生ガイドライン」として刊行されている。

一方、港湾分野では、港湾が沿岸域における物流、産業、生活の中心的な空間として将来にわたって社会の多様な要請に応え、その役割を果たしていくためには、港湾自らが良好な環境の保全と創造に総合的に取り組み、健全で豊かな港湾環境を実現して次世代に継承していくことが不可欠として環境と共生する港湾(エコポート)の形成を目標とする「新たな港湾環境政策」が策定された(運輸省港湾局, 1994)。その後、エコポートを具体的に実現するための各種施策のうち、主にアマモ場を指す砂泥性藻場とホンダワラ類やコンブ類といった大型の海藻で形成される岩礁性藻場を含めた藻場に関連する技術資料として1996年には運輸省港湾局環境整備課・(財)沿岸開発技術研究センターより「藻場造成マニュアル」が、また、1998年には運輸省港湾局監修/エコポート(海域)技術WGより「港湾構造物と海藻草類の共生マニュアル」が、更には2003年1月の自然再生推進法の施行を受けて同2003年には国土交通省港湾局監修/海の自然再生ワーキンググループより「海の自然再生ハンドブック その計画・技術・実践 第3巻 藻場編」が刊行されてきた。

こうしたアマモ場再生のための総論的な枠組みは、その時々研究成果に基づいて拡充されてきたが、核心技術であるアマモ場造成工法については、それにより造成されたアマモ場の長期的な持続性の検証を含めて十分ではなく、画期的な工法が考案されているとは言いがたい。その中で、「播種シートによるアマモ場造成法」(芳田, 2002; 金澤・森, 2003)は高い確実性とコストの低いアマモ場造成法の確立を目指して開発されたものであり、播種シート設置後約10年にわたり安定したアマモ場を形成している造成工法である。本工法

は小中学校の総合学習の一環に取り入れられるなどして現在では全国 36 箇所のアマモ場再生活動に使用されている(東洋建設(株), 2010). この中には, 年間の造成面積が 1000m² を越える比較的大規模な事例もある(長山・近藤, 2005). 本論文は, 「播種シートによるアマモ場造成法」を用いてアマモの自生地隣接してアマモ場造成を行って本造成方法の有効性を検証するとともに, アマモ場造成において確実に成果を残すための造成適地の選定法の開発とその検証を行った. そしてアマモ場が衰退した海域でのアマモ場再生を試み, 継続的に存在するアマモ場を実際に造成した結果について述べるものである.

1.2 論文の構成

本論文の構成を図 1.2.1 に示す. 本論文は全 6 章で構成される.

第 1 章では, 序論として研究の背景と目的について述べるとともに, 本論文の構成を示す.

第 2 章では, 確実かつ効率良くアマモ場造成を実施するために, まずはアマモの生活史とアマモ場の成立条件, 現状について整理する. そして元来, 浅場が少なく, 残された浅場もほとんどが埋め立てられた大阪湾でアマモ場を再生することが出来れば, その手法は他海域へも適用することが可能と考え, 大阪湾を検討対象の海域として取り上げる. その上で, アマモ場の再生を検討するには, 過去にどのような場所にアマモ場が存在していたのかを理解することが重要と考え, 大阪湾におけるアマモ場の衰退の様子を調査した結果(金澤ら, 2005)を述べる.

第 3 章では, 確実なアマモ場造成を目指し, かつ大規模に造成が可能な方法として開発された「播種シート工法」(芳田, 1998)について述べるとともに, 播種法では極めて重要な要素である播種するまでの間の健全なアマモ種子の取り扱い方法について述べる. そして, 大阪湾にごく近い兵庫県明石市の東播海岸地先で実施した播種シートを用いた比較的大規模な実海域試験(芳田, 2002; 金澤・森, 2003)について, 設置後 10 年近く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明らかにした本アマモ場造成工法の有効性について示す.

第 4 章では, 効率良くアマモ場造成を実施する為には, アマモ場造成の対象海域の各種条件を予め検討して造成適地を選定する必要があると考え, 3 次元海浜変形計算法を用いたアマモ場造成適地の評価手法を開発し, アマモ場造成を実施した東播海岸谷八木地区に適用して検証した結果(金澤・森, 2003)について述べる.

第 5 章では、かつては広くアマモ場が存在したが、現在では沿岸の開発などにより消失した海域を対象に、造成適地の評価手法を適用して実施海域を選定し、その上で播種シート工法を適用してアマモ場消失海域でのアマモ場再生の可否を検証した結果(金澤ら, 2005)について述べる。さらに、従来アマモ場が存在しなかった海域でのアマモ場創出の試みとして、港湾域に新設された人工干潟の浅海部でアマモ場造成を試みた結果について述べる。

第 6 章は結論として、本研究で得られた成果を取りまとめる。

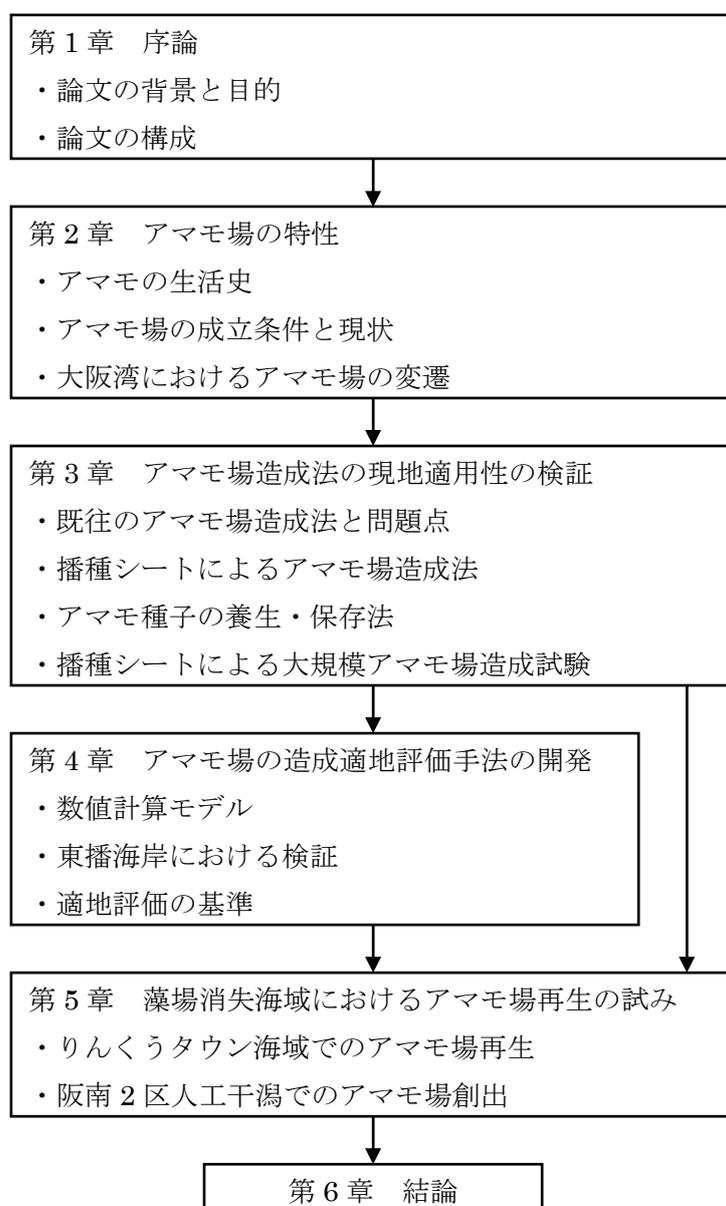


図 1.2.1 本論文の構成

参考文献

- 運輸省港湾局編(1994)：環境と共生する港湾－エコポート－，87p，大蔵省印刷局。
- 運輸省港湾局環境整備課・(財)沿岸開発技術研究センター(1996)：藻場造成マニュアル，87p。
- 運輸省港湾局監修・エコポート(海域)技術 WG (1998)：港湾構造物と海藻草類の共生マニュアル，101p，(財)港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所。
- 金澤 剛・森 鐘一(2003)：現地アマモ場造成試験と適地評価に関する研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.1266-1270。
- 金澤 剛・明松正二・多賀 博・稲田 勉(2005)：も場衰退海域におけるアマモ場再生試験について，海洋開発論文集，第 21 巻，pp.677-682。
- 金澤 剛・芳田利春・三宅亮志・出口一郎(2005)：大阪湾における海岸線とアマモ場の変遷について，第 33 回環境システム研究論文発表会講演集，pp.337-342。
- 国土交通省港湾局監修・海の自然再生ワーキンググループ(2003)：海の自然再生ハンドブック その計画・技術・実践 第 3 巻藻場編，112p，ぎょうせい。
- 水産庁・(社)マリノフォーラム 21(2007)：アマモ類の自然再生ガイドライン，128p。
- 東洋建設株式会社(2010)：環境・社会報告書 2010，pp.31-34。
- 長山英樹・近藤勝裕(2005)：福井県大飯町沿岸におけるアマモ場造成に適した環境条件および施工方法の把握，第 33 回環境システム研究論文発表会講演集，pp.343-349。
- 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。

第2章 アマモ場の特性

2.1 概説

アマモ場は、砂泥質の沿岸域に生育する温帯性の種子植物であるアマモが群落を形成した藻場である。アマモ場は、表 2.1.1 に示したように大別して 3 つの機能を有している(環境省, 2004)。すなわち、1 つが沿岸生態系の中でアマモ自体およびその葉上の付着藻類により一次生産を行い、枯死したアマモは腐食連鎖を通じて高次消費者を支えるといった物質循環機能である。また、多くの魚類とその他の小動物が集まる生物多様性の維持機能、幼稚魚の育成機能、葉上などに分布する珪藻類とヨコエビ等の小動物、そして幼稚魚からなる食物連鎖を維持する餌料供給機能、魚類やイカ類に産卵基質を提供する産卵場形成機能といった生物の共存機能が 2 つ目であり、さらには、アマモの生育に伴う栄養塩の吸収や繁茂した葉部が海水の流動を低減して懸濁物質の沈降を促進する水質浄化機能、アマモ群落が地下茎を張り巡らせることによる底質安定化機能、光合成の際に海水中に溶存酸素を供給する環境形成・維持機能からなる環境保全機能の 3 つである。こうした多様な各種機能を有するアマモ場は、水産上の有用性も含めて、広く自然環境および生態系の保全に極めて重要な役割を果たしている。

表 2.1.1 アマモ場の機能の例(環境省, 2004)

機能の分類		特 徴
物質循環機能		<ul style="list-style-type: none"> ・一次生産: 海草及びその葉上に生育する付着藻類は、太陽からの光のエネルギーを化学エネルギーとして他の消費者が利用できる有機物の形に固定する一次生産を行う。 ・分解・物質循環: 枯死したアマモは分解されてデトリタスとなり、バイオターベーション(生物擾乱又は生物攪乱)や波浪による底質の攪乱などによって底質中に有機物を供給する。また、主に腐食連鎖を通じて、魚類などの高次消費者を支える。
生物の共存機能	生物多様性の維持機能	多くの無脊椎動物や魚類の生息場所、採餌場、隠れ場として利用される。そのため、藻場は多種多様な生物を維持する機能を持つ。
	幼稚魚育成機能	藻場は、幼稚魚の隠れ家としての保護機能を持つ。
	餌料供給機能	葉上・葉間・海底に分布する珪藻類は小動物(ヨコエビ類、アミ類など)の、また小動物は幼稚魚の適切な質、大きさの餌となる。
	産卵場形成機能	海草の地上部(葉、茎、花枝など)は、付着卵を産む魚類・イカ類の産卵基質となる。
環境保全機能	水質浄化機能	<ul style="list-style-type: none"> ・海草類は、その生育に伴い、富栄養化の要因であるリンや窒素を海水及び底泥中から吸収・除去する。 ・繁茂した葉部は水の流動を妨げ、懸濁物質を海底に沈降させる。
	底質安定化機能	海草群落の地上部が沖合からの波の力を減衰させ、また地下茎を張り巡らせることにより、底質を安定化させる。加えて、漂砂などを抑制し、砂浜や干潟の縮小を防止する。
	環境形成・維持機能	<ul style="list-style-type: none"> ・上記と同様に、海草の地上部が海水の流動を抑えることにより、藻場内は静穏状態が形成される。 ・光合成の際、大気から海水へと溶け込んだ溶存態炭酸ガスを吸収するとともに、海水中に溶存酸素を補給する。

しかしながら、この沿岸環境において貴重なアマモ場も、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る透明度の低下によって、現在ではその面積が著しく減少している。

こうした状況のもと、アマモ場の再生が望まれるとともに、東京湾や大阪湾などの悪化した海域環境を再生させる方策の一つとしてもアマモ場の造成が取り挙げられている（大阪湾再生推進会議，2004；東京湾再生推進会議，2011）。そこで、本章では、确实かつ効率良くアマモ場造成を実施するために、まずはアマモの生活史とアマモ場の成立条件について整理する。そして、アマモ場の再生を検討するには過去にどのような場所にアマモ場が存在していたのかを把握して、その海域におけるアマモ場再生の方向性を得ることが重要と考えて、大阪湾を例にアマモ場の衰退の様子を調査し、今後の大阪湾でアマモ場を再生していくための方向性を見出すことを試みた結果(金澤ら，2005)について述べる。

なお、検討対象とした大阪湾は、表 2.1.2 に示すように水面面積が 1450km²であって、東京湾の 1380km²よりやや大きい。しかしながら、水深が-10m以浅の水面面積は、東京湾が全水面の 31%に相当する 360km²であるのに対し、大阪湾のそれは全水面の 10%である 140km²で東京湾の半分にも満たない。また、三大湾のうちのもう一つである伊勢湾の水面面積は 2342km²、水深が-10m以浅の水面面積は 620 km²で全水面に対する割合は 29%である(以上、国土交通省近畿地方整備局，2011)。このように、大阪湾は東京湾や伊勢湾に比較して-10m以浅の水面面積が狭いことが特徴で、これは、もともと浅い水深帯に生育するアマモが生育可能な面積が狭いことを意味している。しかも、後述するように、大阪湾のアマモが生育可能な浅瀬はその多くが埋め立てられているので、大阪湾でアマモ場を再生するにはいくつもの条件を克服する必要があると考えられる。したがって、大阪湾でアマモ場を再生することが出来れば、その手法は他海域へも適用することが可能と考えられた。こうしたことより、ここでは大阪湾を検討対象の海域として取り上げたものである。

表 2.1.2 三大湾との比較(国土交通省近畿地方整備局，2011)

	大阪湾	東京湾	伊勢湾
水面面積(km ²)	1,450	1,380	2,342
-10m以浅水面面積(km ²)	140(10%)	360(31%)	620(29%)
-20m以浅水面面積(km ²)	740(53%)	730(63%)	1,340(63%)
埋立面積(km ² ; S20.8~H3.3)	85	157	79

※大阪湾：紀淡海峡以北、明石海峡以東の海域
 東京湾：三浦半島剣崎-房総半島洲崎以北
 伊勢湾：志摩市大王崎-渥美半島伊良湖崎以北(三河湾を含む)

2.2 アマモの生活史

陸上の植物と同じ緑色の頭花植物であるアマモは、春から夏にかけて成熟株(花枝)の先端に花穂を付け、開花・結実し、種子を放出する(図 2.2.1)。放出された種子は海底の底質中に埋没すると晩秋から初冬にかけて発芽する。前川(2002)によれば、幼体は地上部の葉および地下茎を更新させながら伸張して夏を越し、晩秋から初冬に新たな新生株(栄養株)を形成する。前年度に形成された栄養株は初春から初夏にかけて茎を伸長させ、成熟株となり、種子を結実する。結実後の生殖株は枯死し流失する。一方、残った未成熟株(栄養株)は夏期に葉の大部分が枯死・流失し草体長を短くして夏を越し、秋期に再び葉が伸張して成熟するとしている。さらに前川(2002)は、アマモ場の周年変化を生長や成熟の観点から、水温が 20~10℃に低下する 10~3 月頃は地下茎の分枝による新生株と種子の発芽による幼体が出現し、草体長が伸びる分枝・発芽・伸長期とし、水温が 10~20℃へ上昇する 3~6 月頃を成熟株が形成、種子が成熟・放出される開花・結実期、水温が 25℃を越える 6~9 月頃を現存量と草体長が減少する衰退期と分類している。

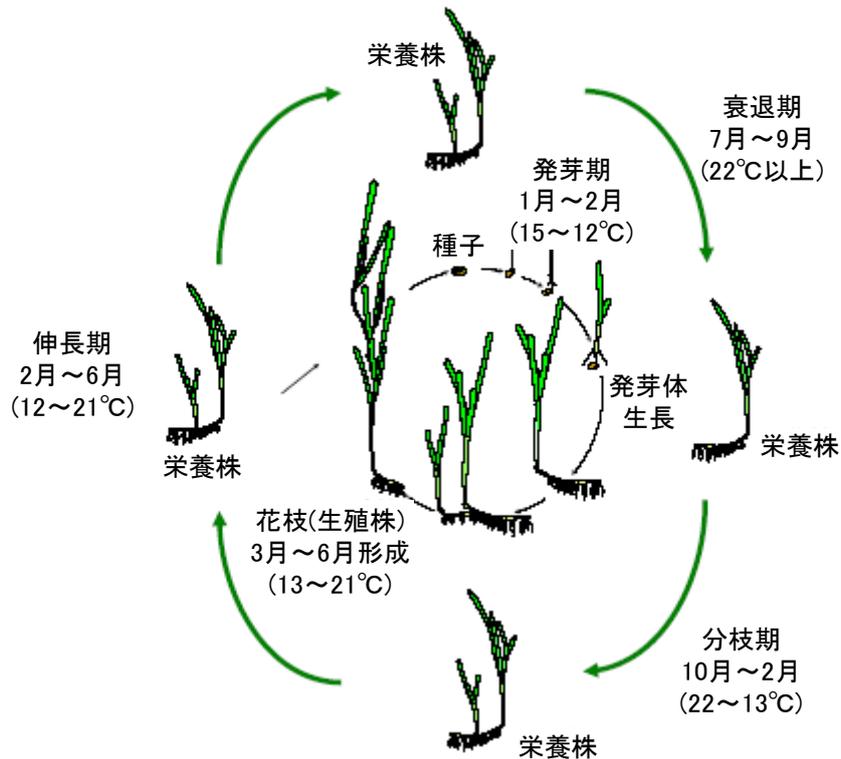


図 2.2.1 アマモの生活史(水産庁・(社)マリノフォーラム 21, 2007)

2.3 アマモ場の成立条件

アマモ場の再生を目指してアマモ場を確実に造成していくためには、確実性が高く効率の良いアマモ場造成法を開発し、アマモの生育に適した箇所で実施する必要がある。アマモ場造成方法について詳細な検討を行った川崎ら(1988)は、アマモ場の適地選定基準として、干出しないこと、年平均水中光量が $15\text{Ly/day}(3\text{E/m}^2/\text{day})$ 以上であること、砂面変動幅は通常 $2\sim 3\text{cm}$ 以下であり、最大でも 10cm 以上とならないこと、底曳漁場が行われていないこと、海水の塩分が $17\sim 34\text{‰}$ の範囲であること、8月の平均水温が 28°C 以下であること、海藻類の漂流物が少ないこと、栄養塩は底質中のアンモニア態窒素濃度が $100\mu\text{M}$ 以上、リンについては特に考慮する必要がないこと、などを示している。

また、アマモ場の成立条件について前川(2002)も同様の項目を挙げているが、特に図 2.3.1 示すようにその影響度の強弱を示している。

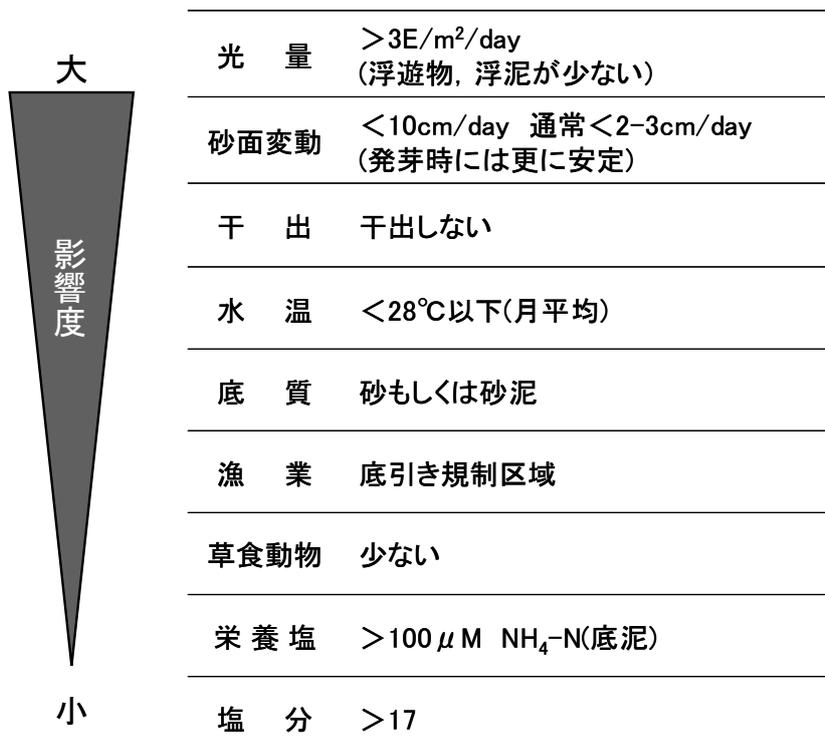


図 2.3.1 アマモの生育に適した環境条件(前川, 2002)

さらに、丸山ら(1987)はアマモ場を造成する際の、対象海域の海象条件と底質条件などから造成に適した場所を選定する判定手法の必要性を指摘し、その手法確立のため、アマモ場生育限界について検討している。その中で丸山ら(1987)は、アマモ場が海岸線に沿って帯状に分布する例が多く見られることから、岸側と沖側に 2 つの生育限界が存在するとし、沖側では光合成に影響する光の強さ、岸側では砂移動に影響する波・流れといった外力の強さであると指摘した。そして、岸側の生育限界について現地調査結果から、実海域でパッチ上に群生したアマモ場が高波浪になると周辺部から洗掘を受けて流出することを確認し、底面変化量にして約 10cm 程度がアマモの岸側の生育限界であることを明らかにした。また水理実験による検討では、アマモ場適地の岸側限界を評価するのにシールズ数 Ψ が指標として有効であることを示し、生育限界としては $\Psi=0.08$ を提案している。このシールズ数を用いたアマモ場の評価はその後も種々の研究がなされ、藻場造成型漁港構造物調査・設計ガイドライン((社)全国漁港漁場協会, 2003)、海の自然再生ハンドブック第 3 巻藻場編(国土交通省港湾局監修/海の自然再生ワーキンググループ, 2003)やアマモ類の自然再生ガイドライン(水産庁・(社)マリノフォーラム 21, 2007)などのガイドライン等でも取り上げられている。

2.4 アマモ場の現状

日本の沿岸域における岩礁性藻場を含めた藻場およびアマモ場の現状は、環境省(2004)によると、1991年時点で日本の沿岸域に現存する藻場の総面積は201,212haであり、海草藻類が生育できる水深20m以浅の海域面積約3,088,000haの僅か6.5%である。このことは、海草藻類は沿岸浅海域のごく一部の範囲にしか生育できないことを意味している。特にアマモは水深数mまでの静穏な内湾の砂泥域のみで生育できるので、その生育範囲に限られるとともに、その海域は埋立や干拓といった人為的影響を直接受けることから、アマモの生育面積も大きな影響を受けたことは容易に推察されると記されている。

また、環境庁第4回自然環境保全基礎調査(1994)によると、1978年から1991年の間に、日本沿岸の藻場総面積は207,615haから201,212haへと13年間で6,403haが消滅したことが明らかにされており、アマモ場(熱帯海草藻場を含む)についても、1978年の51,541haから1991年の49,464haへと2,077haが消滅したとされている(表2.4.1)。アマモ場の消滅面積が大きいのは、陸奥湾、三河湾、播磨灘北などであり(表2.4.2)、こうした藻場の消滅原因は、埋立などの直接改変が主たるものであり、他には水質汚濁などの生育環境の悪化なども一因とされている。

さらに、環境庁第5回自然環境保全基礎調査(1997-2001)によると、藻場総面積は142,459ha、アマモ場の面積は25,843haと示されている。第4回調査と第5回調査では集計方法が異なるため、これらの結果を単純に比較することは適切でないものの、依然としてアマモ場を含め藻場の消滅が続いていることが示唆されている(環境省, 2004)。

表2.4.1 現存藻場と消滅藻場面積(環境省, 2004)

藻場の区分	現存藻場(ha):a (1991年時点)	消滅面積(ha):b (1978年~1991年)	消滅比率(% (b/(a+b))
アマモ場	49,464	2,077	4.0
ガラモ場	85,682	2,315	2.6
コンブ場	35,724	507	1.4
アラメ場	64,483	1,687	2.5
ワカメ場	31,381	1,550	4.7
テングサ場	19,024	1,388	6.8
アオサ・アオノリ場	9,109	489	5.1
その他	21,009	403	1.9

表2.4.2 代表的海域のアマモ場の消滅状況(環境省, 2004)

海域	現存アマモ場(ha):a (1991年時点)	消滅面積(ha):b (1978年~1991年)	消滅比率(% (b/(a+b))
陸奥湾	6,862	369	5.1
三河湾	390	169	30.2
日向灘	10	44	81.5
備讃瀬戸西	974	57	5.5
播磨灘北	176	218	55.3
天草灘	2	77	97.5
八重山列島	4,091	16	0.4

2.5 大阪湾におけるアマモ場の変遷

2.5.1 はじめに

2004年3月に大阪湾再生推進会議において大阪湾再生行動計画が策定され、大阪湾再生のための水環境改善方策としてコンブ養殖プレートによる水環境改善実験や人工干潟創造実証実験など種々の社会実験・実証実験が行われ始めている(例えば、大阪湾再生推進会議, 2005).

この大阪湾再生の一方策としてアマモ場の回復が挙げられ、実際に取り組みが始まっている(大阪湾再生推進会議, 2005; 金澤ら, 2005)が、アマモ場を再生する海域を検討、選定することは重要な課題である。例えば、著者らが兵庫県西宮市御前浜の前面海域でアマモの生育試験を検討した際、昔の海岸の状態を知る人々からは、「この海岸にはアマモは無かった。アマモが繁茂すると現在の生態系が壊されるのではないか?」と言われたことがある。しかしながら、現在の御前浜前面には人工島が、そして沖合には沖防波堤が設置され、沿岸の環境は昔とは大きく異なっている。したがって、地域市民との合意形成は必要であるが、アマモ場造成は多様性のある生態系を創出する方策の一つとして、新しい水環境に合致したものと考えられる。

ここでは、大阪湾においてアマモ場を再生していくことを念頭に、かつてアマモ場が大阪湾のどの海域に分布し、大阪湾の海岸線の変化とともにどのようにアマモ場が変遷していったかを調査した。そして、今後の大阪湾でアマモ場を再生していくための方向性を見出すことを試みた結果(金澤ら, 2005)について述べる。

2.5.2 調査資料および方法

(1) 海岸線

明治初期からの海図や地形図，航空写真を収集，比較検討することで，大阪湾沿岸の海岸線変化を把握した。

(2) アマモ場

過去から現在に至る大阪湾沿岸のアマモ場の分布に関して，大阪府や兵庫県の水産関係の有識者，また，大阪湾沿岸の漁業関係者等へヒアリングを実施するとともに，文献調査を実施した。収集した大阪湾におけるアマモ場の調査記録一覧を表2.5.1に示す。なお，表2.5.1に示した各調査記録は，アマモ場と岩礁性藻場を総じて藻場と称した調査の結果であり，ここではこれらの中からアマモ場に関する調査結果のみ抽出して使用した。

表2.5.1 大阪湾におけるアマモ場調査記録一覧

発行年	発行機関	資料名
1967	瀬戸内海水産開発協議会	瀬戸内海における藻場の現状
1973	大阪府水産試験場	昭和46年度 大阪府水産試験場事業報告
1974	南西海区水産研究所	瀬戸内海の藻場—昭和46年の現状—
1979	兵庫県	第2回自然環境保全基礎調査 干潟・藻場・サンゴ礁分布調査報告書
1979	南西海区水産研究所	沿岸海域藻場調査 瀬戸内海関係海域藻場分布調査報告—藻場の分布—
1979	大阪府水産試験場	昭和52年度 大阪府水産試験場事業報告
1992	大阪府水産試験場	平成2年度 大阪府水産試験場事業報告
1994	環境庁	第4回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書

2.5.3 海岸線の変遷

(1) 明治以前

明治以前の大阪湾沿岸は武庫川、神崎川、淀川、大和川など河川河口部の浅場が食料増産のための新田開発として埋め立てられてきた。また、港湾も神戸港や大阪港、堺港が栄えたが、埋立地の外郭施設である護岸は前浜もしくは水深の浅い砂浜に設けられ、埋立地前面には未だ河川から流出した砂で遠浅の海岸があった。開国に伴い1867年に開港した当時の神戸港には大型船岸壁がなく、大型の外国船は沖荷役を余儀なくされていた(国土交通省近畿地方整備局神戸港湾事務所, 2004)ことから、浅海部が広がっていたことが推察される。

(2) 明治～昭和30年(1955)

明治時代、大正時代、そして昭和30年以前までの埋立は、大量の物資輸送のために大型化する船舶に対応した港湾整備と工業用地の確保のためであり、明治30年(1897)の大阪港、明治39年(1906)の神戸港の各修築工事着工(中山, 1999)に伴い、それら周辺部が埋め立てられた。しかしながら、その規模は比較的限定的で大規模な浅海部の消失は引き起こさなかった。一例として、昭和9年(1934)刊行の大阪湾の海図(第5管区海上保安本部海洋情報部)をもとに作成した大阪湾の海岸線と等深線を図2.5.1に示す。これによると神戸港や大阪港、堺港の沖合いに防波堤が設置あるいは工事中であるとともに、その陸側では埋立地が見られる。しかしながら、これら港湾部以外の大阪湾沿岸には水深5m以浅の浅海域が広がっているのが認められる。こうした状況は、さかのぼって明治36年(1903)刊行の大阪湾の海図(第5管区海上保安本部海洋情報部)でも確認できた。

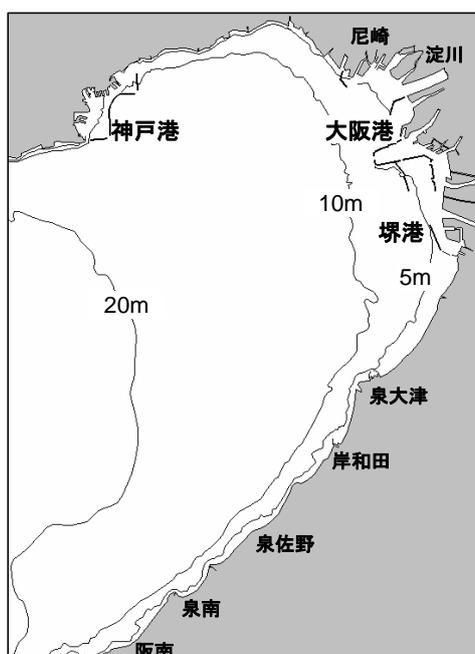


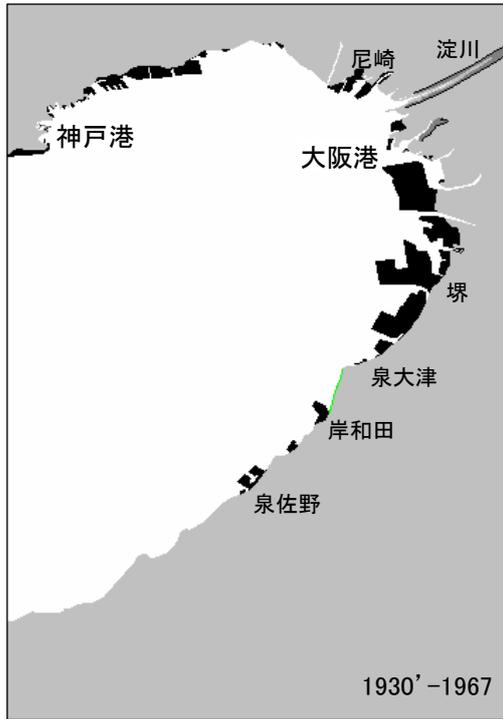
図2.5.1 昭和9年当時の大阪湾の海岸線と等深線

(3) 昭和30年(1955)～現在

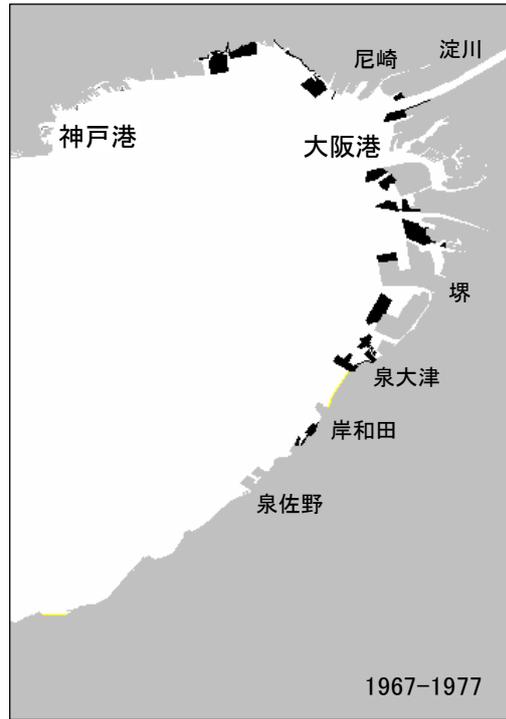
昭和31年度(1956)の「経済白書」には、「もはや戦後でない」と述べられているように、昭和30年(1955)頃からの経済復興，発展・拡大に併せて，沿岸部の埋立が大規模に進められた。図2.5.2に国土地理院発行の1/50,000地形図から作成した大阪湾沿岸（淡路島を除く）の埋立地の変遷を示す。図中，黒く塗りつぶした領域が，異なる2カ年の海岸線から求めたその間に新たに埋立てられた領域を示している。なお，図中の年数表記が最も古い海岸線だけが異なっているが，これはこの海岸線が1930年代の複数年の地形図を使用して作成したためである。また，各図には1989年の関西国際空港島のように一部データが欠落している部分もある。図2.5.2によれば，昭和42年(1967)までに神戸から大阪，泉大津までの広い範囲で，さらに南部の岸和田や泉佐野でも港湾および漁港整備のために埋立が実施されている。さらに，昭和52年(1977)から平成元年(1989)年の間には，兵庫県でポートアイランドや六甲アイランドといった大規模人工島が建設され，大阪府では泉南海域で関西国際空港島とその対岸で埋立が行われた。

また，伊勢湾台風(1959)，第2室戸台風(1961)などの大型台風による高潮被害を受けて，その対策としての防潮護岸も整備されている。このように，昭和30年(1955)以降の昭和年間のおよそ35年の間に実施された埋立と海岸整備によって，大阪湾湾奥部の浅場は殆どなくなった。

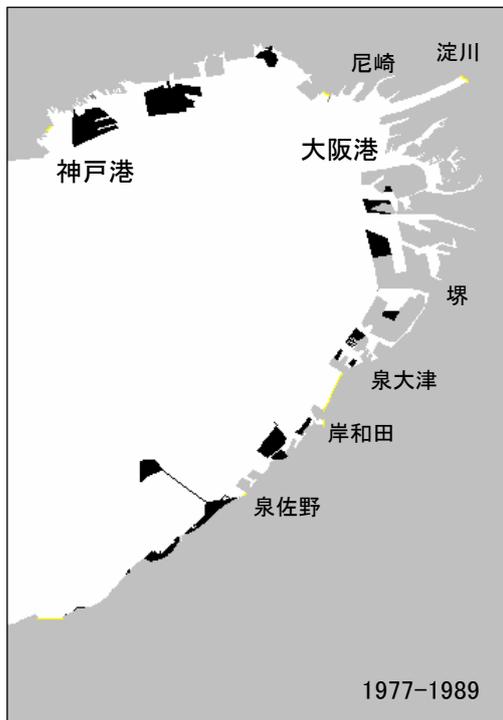
さらに，時代が平成に入ってから，埋立は湾奥部から大阪湾周縁の各海域にまで及び，淡路島の東側沿岸部等も埋立が進められた。これにより，現在の大阪湾には手付かずの自然海岸は殆どなく，沿岸の浅場も殆どない状態である。



(a) 昭和初期-昭和42年



(b) 昭和42年-昭和52年



(c) 昭和52年-平成元年



(d) 平成元年-平成9年

図2.5.2 大阪湾沿岸の埋立地の変遷

2.5.4 アマモ場の変遷

(1) 昭和30年(1955)以前

水産関係の有識者や漁業関係者等へのヒアリング調査を実施した結果，昭和30年以前の大阪湾には，以下の海域にアマモ場があったことが確認できた。

- ・淡路島の成ヶ島
- ・須磨海岸
- ・尼崎丸島地区前面海域
- ・大阪府泉南海岸(堺市～高石市～岸和田市～岬町)

大阪府高石市漁協でのヒアリング調査では，高石地先のアマモ(アゼモ)は海岸に沿って連続して繁茂しているのではなく，間隔をおいて群生していたとのことであった。そして，昭和22年(1947)頃のアマモ場の岸沖方向の分布状況の模式図として図2.5.3が示された。図2.5.3が示すように，アマモは干潮時に現れる沖側前面の砂州と陸岸の間にあるタイドプールで密生し，また砂州前面の干潮時に干出ししない水深以深にも繁茂していたとのことである。

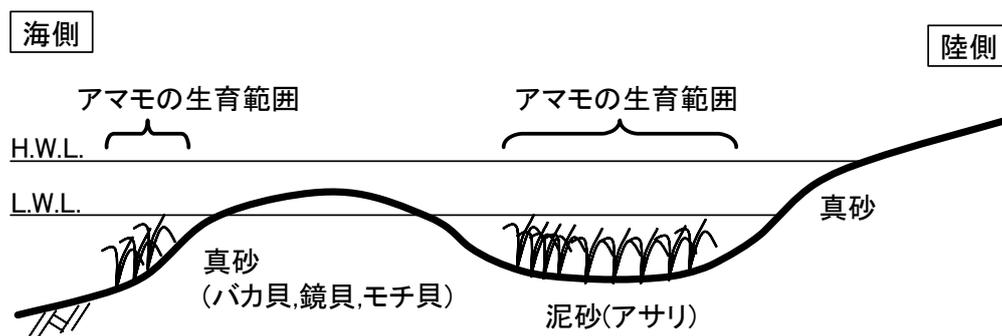


図2.5.3 昭和22年ごろのアマモの生育状況

このアマモの生育状況は、尼崎で長年渡船業を営んできた古老の「武庫川を挟んで東側の丸島地区では、干潮時に沖合に砂州が現れ、砂州と陸岸の間が浅瀬になり、その浅瀬にアマモが密生していた。」との話と同一である。しかしながら、同氏は「武庫川の西側の甲子園浜ではアマモはなかった。物心がついた小さい頃から、甲子園浜で行われてきた地曳き網をみていたが、網の中にこんな葉っぱが入っているのはみたことがない。」とも話している。このことは、西宮市史(西宮市, 1964)による以下の漁場に関する記述とも合致する。

鳴尾村

区域 鰯漁場ハ東西新田村字丸島ヨリ西今津村境字申川ニ至ル三十三町三十四間、
沖手へ凡一里ノ間トス、

水底ノ概状 海岸ニ接近セシ所ハ深サ一尺ナリ、之ヨリ沖ノ方深サ三尋ノ所ハ水底砂利ナリ、又陸ヲ距ル三十間ノ所ハ深サ四尋以上アリ、水底苔藻ヲ叢生セリ、此所ヨリ沖手ニ小鰯「ドロメン」群集ス、尚漸々進ンテ沖ニ出ツレハ、七尋以上ノ深サトナリ、其水底ハ総テ泥濘ナリ、

この記述から、水深約5m(三尋)~12m(七尋)の海底は砂利で、アオサやホンダワラ類の苔藻が密生していたことがわかる。なお、5m以浅の浅場にアマモが生育しているとの記述はない。

これらより、大阪湾沿岸部では大小の河川から供給される土砂が多く、また十分な浅場が存在したことからアマモの生育条件が満たされており、実際にアマモも存在した。しかしながら、波、流れによる漂砂が卓越して海底地形が絶えず変動する場所では、アマモが定着して藻場を形成することはなく、沖合に砂州が形成された砂州と陸岸との浅瀬では、砂州が波、流れの影響を緩和した静穏域となるため、海底地形が安定してアマモ場が形成されたものと考えられる。

上記のヒアリング調査から、昭和30年(1955)以前の大阪湾沿岸部では、沿岸部全域ではないが、海底地形が安定した浅場には安定したアマモ場があったと考えられる。

(2) 昭和30年(1955)以降

昭和30年(1955)以前に大阪湾の各所でみられたアマモは、経済の復興・拡大に合わせた沿岸部の埋立、防潮護岸の建設、工場排水による水質の悪化により、昭和30年(1955)～平成元年(1989)の間に衰退、消滅していった。図2.5.2よりわかるように、昭和50年代迄に神戸～大阪～堺～貝塚に至る沿岸部は全て埋め立てられ、これら海岸線のアマモ場は消滅した。

また、埋立を行わない沿岸部でも、大型台風による高潮被害から人命、家屋・財産を守るための防潮堤や、沿岸部に沿って走る道路の波飛沫被害に対する護岸などの構造物が前浜部に建設されていった。大阪府泉南地方では、この防潮堤や護岸などを建設したために、前浜が消失し、アマモ場が消失したとのヒアリング結果を得た。

さらに、この時期のアマモ場消失のもう一つの原因として水質の悪化にともなう透明度の低下が挙げられる。堺から岸和田、貝塚に至る沿岸が埋め立てられてアマモ場が完全に消滅するまで、水質の悪化すなわち透明度の低下によりアマモが減少したとのことである。

平成元年(1989)以降も沿岸の埋立が進み、アマモが生育できる浅場がさらに減少し、アマモ場が自然に再生することは難しくなっている。

アマモ場の調査が行われ始めたのも昭和30から40年代ごろからで、先に表2.5.1に示した調査記録の結果を以下に示す。なお、各調査記録における以下の年数表記は調査実施年である。

a) 昭和40年度(1965)

大阪府の沿岸は未調査である(瀬戸内海水産開発協議会, 1967)。

兵庫県内は淡路島東岸に数カ所のアマモ場があるが、全部を合わせても1haに達しない(瀬戸内海水産開発協議会, 1967)(図2.5.4(a))。

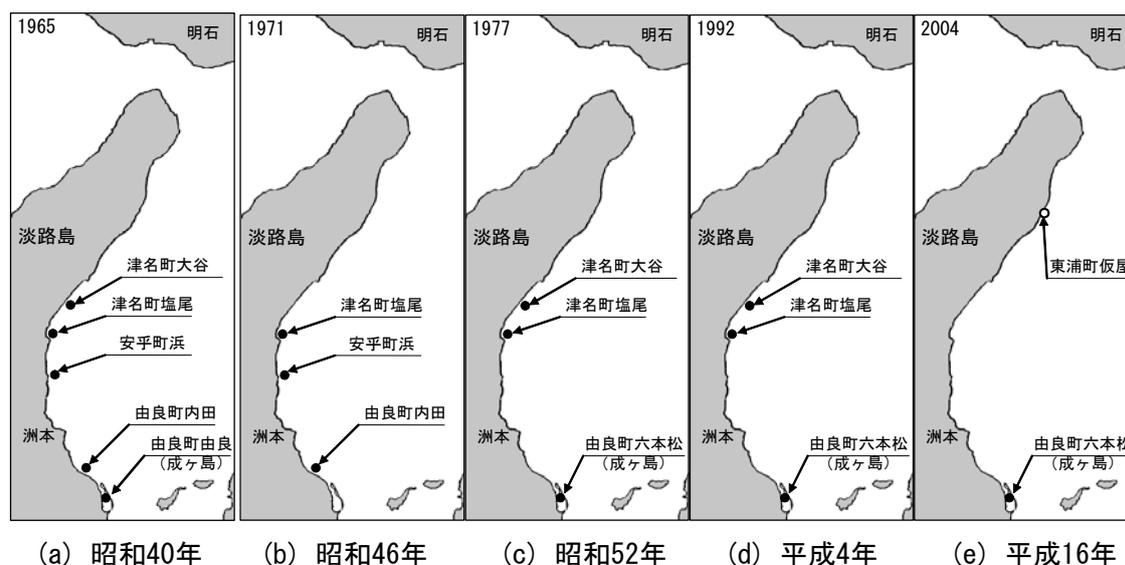


図2.5.4 淡路島東岸域のアマモ場

b) 昭和46年度(1971)

大阪府の調査結果(大阪府水産試験場, 1973)によれば, 図2.5.5に示すように大阪南部の箱作海岸と淡輪黒崎海岸でアマモ場が認められている. 箱作海岸のアマモ場は昭和35年(1960)以前には図中2カ所に分かれているアマモ場が接続し繁茂していたが, 以後衰退した. 淡輪黒崎海岸は昭和40年(1965)頃までは全体にわたり, かなり密に繁茂していたが, 疎らな部分が増えたと記述されている. また, 深日港内では昭和40年頃に水質汚濁と思われる原因により消失し, 小島周辺も昭和35年頃から衰退して昭和40年に消失したと記されている.

一方, 兵庫県内は淡路島東岸の由良港内では消失, 津名町地先のアマモ場は埋立が予定されており, わずかに残ったアマモ場も植生の衰退が目立つと記されている(南西海区水産研究所, 1974)(図2.5.4(b)).

c) 昭和52年度(1977)

大阪府の調査では, 大阪府下にはアマモ場は認められず, 消滅した(大阪府水産試験場, 1979).

兵庫県内のアマモ場は淡路島東岸の安乎町浜で消失し, 津名町大谷, 洲本市六本松(成ケ島の内海側)で再生している(兵庫県, 1979)(図2.5.4(c)).

d) 平成2年度(1990)~平成4年度(1992)

この年も大阪府下にはアマモ場は認められていない(大阪府水産試験場, 1992).

兵庫県の淡路島東岸に残ったアマモ場は津名町大谷, 津名町塩屋, 洲本市六本松であるが(環境庁自然保護局, 1994), 平成6年には沿岸部の埋立が行われたため津名町大谷および塩屋のアマモ場は消滅した(図2.5.4(d)).

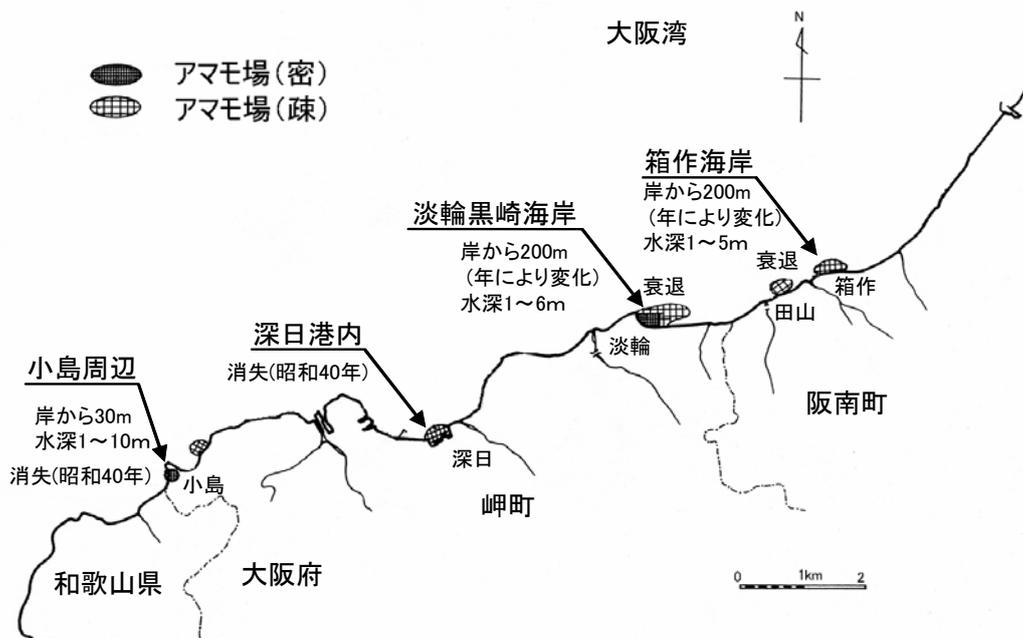


図2.5.5 大阪府泉南海岸のアマモ場(昭和46年)(大阪府水産試験場, 1973)

(3) 現在

大阪湾および瀬戸内海の水質を改善すべく、昭和53年(1978)に瀬戸内海環境保全臨時措置法が改定され、特別措置法となり、昭和55年(1980)から始まったCOD総量規制も順次目標を上げ、平成8年(1996)には第四次COD総量規制が制定されてきた。これにより、大阪湾の透明度は徐々にではあるが改善傾向を示し(大阪府：公共用水域水質等データベース)、残存するアマモ場の回復が聞かれるようになってきている。洲本市六本松(成ヶ島の内海側)のアマモ場は、疎生から密生へと大きく回復し、平成16年3月時の調査では成ヶ島の沿岸に沿って約2kmにわたってアマモが群生しているとのことである(成ヶ島を美しくする会談話)。また、アマモ場は消滅したとされていた大阪府下では、阪南市の尾崎港に自生しているのが確認されている(大阪府、2004)。

沿岸部の埋立も港湾施設や工業用地の造成だけではなく、自然環境の回復のために人工海浜が淡路島北東部や関西国際空港対岸のりんくうタウン海域などで造成されるようになった。そして、その前面ではアマモが育つ浅場が回復したと考えられる。2003年11月に著者らが実施した現地調査で、淡路島・仮屋漁港内でアマモの流れ藻がみられたことから、漁港周辺に造成された人工海浜にアマモが生育しているものと期待された(図2.5.4(e))。

2.5.5 大阪湾におけるアマモ場造成の方向性

アマモ場が過去には存在したが、現在ではほとんど消滅してしまった大阪湾沿岸において、アマモ場を再生する方策を考える。

まず、水質環境が改善し生育基盤が整ってアマモが生育する環境に復した浅場で、自然にアマモが回帰することを期待する。大阪湾には中央部に時計回りの沖ノ瀬還流や東岸に沿って南下する東岸恒流帯がある(藤原ら, 1989; 中辻・藤原, 1995)。したがって、既存のアマモ場から種子をこの大阪湾を循環する自然の力に乗せて沿岸部に毎年供給していこうとするものである。長谷川ら(2008)は、大阪湾における藻場からの海藻幼胚の移動を明らかにするため、3次元流動計算を用いて海藻幼胚の粒子追跡シミュレーションを実施している。それによると、大阪湾内の各所から放出された海藻幼胚は数日程度の比較的短期間で大阪湾内に広く移流・拡散するものの、神戸港から堺泉北港までの湾奥部港湾域では海藻幼胚の出入りがほとんどないなどの局所的に海藻幼胚が到達しない海域があると指摘している。また、淡路島東側の藻場からの海藻幼胚は大きな移動はせず淡路島東側の沿岸に留まるという結果を示している。アマモ種子は花枝や花穂が流れ藻として海面を漂うときに一緒に運ばれ、種子が熟すると花穂から落下して海底に着底するので、海藻幼胚とは海域での輸送過程がやや異なるとは考えられる。それでも、長谷川ら(2008)の検討結果を参考に大阪湾でのアマモ種子の動きからアマモ場の回復を考えたとき、淡路島の由良から洲本までの海岸線には自然回復した成ケ島からのアマモ種子供給が期待できる。しかしながら、須磨～神戸～大阪～泉大津～泉南までの海岸線には現在アマモ場はなく、これら沿岸部へのアマモ種子の供給は明石海峡を通じて流入する東播海岸などのアマモ場だけで、長谷川ら(2008)の結果によれば、これらのアマモ種子が大阪湾湾奥部あるいは東岸に到達するのは、難しいと考えられる。仮にアマモ種子が湾奥部に到達できたとしても、その水質は十分に改善されたとは言いがたく、浅場はなお少ない。そこで、中間の幾地点かでの人工的なアマモ場造成が重要となる。

大阪府沿岸でアマモが確認された阪南市尾崎港より北の海域でのアマモ場再生は、沿岸に沿って南下する恒流と水質の程度を勘案して、泉佐野や岸和田等できるだけ恒流の上流側でのアマモ場造成が効果的である。現在アマモ場再生が試みられているりんくうタウン海域(金澤ら, 2005)でアマモ場が定着すれば、泉南部の海岸線へのアマモ種子供給基地となることが期待される。なお、2006年3月14日の産経新聞によると、大阪湾東岸の貝塚市において、人工海浜である二色の浜海水浴場前面にアマモの自生が確認されたと報道されている。このアマモ場への種子の供給源は定かではないが、大阪湾東部の比較的広い範囲に似たような浅場が造られれば、アマモ場が自然に再生する可能性がある。また、この二色の浜のアマモ場自体がアマモ種子の供給基地となることも期待される。

一方、須磨～神戸～大阪の海岸線に対しては須磨海岸にアマモ場を再生することが最適であると考えられる。しかし、須磨から神戸にかけてはノリ養殖が盛んであり、須磨海岸にアマモ場を再生することには漁業者の賛同を得るのに難しい面がある。よって、須磨～神戸

にかけては明石海峡を通過してくる東播海岸からのアマモ種子供給による自然な回復が期待される。

また、西宮市御前浜や甲子園浜など沖防波堤や沖合人工島が前面にあり閉鎖性の強い湾奥部については、自然の力によるアマモ種子の供給は期待できない。よって、各水域で水質や底質などアマモが生育する環境条件を整えた後、人がアマモ場造成を実施する必要があると考えられた。

2.6 まとめ

本章では、確実かつ効率良くアマモ場造成を実施するために、まずはアマモの生活史とアマモ場の成立条件、現状について整理した。そして元来、浅場が少なく、残された浅場もほとんどが埋め立てられた大阪湾でアマモ場を再生することが出来れば、その手法は他海域へも適用することが可能と考え、大阪湾を検討対象の海域として取り上げることとした。その上で、アマモ場の再生を検討するには、過去にどのような場所にアマモ場が存在していたのかを理解することが重要と考え、大阪湾におけるアマモ場の衰退の様子を調査した結果を述べた。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 大阪湾におけるアマモ場の衰退の様子を調査した結果、大阪湾沿岸部の浅場にはアマモ場が散在していたが、昭和 30 年以降の経済復興に伴う沿岸部の埋立と大阪湾の透明度の低下によりアマモ場は殆ど消滅した。
- (2) しかしながら、瀬戸内海の水質保全規制や周辺諸都市の下水道整備などにより、大阪湾の水質、特に透明度の改善傾向がみられること、また、海岸の親水性を高めるために多くの人工海浜が造成されるようになったことから、自然にアマモが回帰する海域もみられるようになった。
- (3) 今後の大阪湾におけるアマモ場造成の方向性としては、湾内の時計回りの恒流と海水の透明度を勘案して、できるだけその上流側で造成を行って種子の供給基地とし、下流域は自然な再生を期待することが考えられた。

参考文献

- 大阪府：公共用水域水質等データベース（オンライン），
http://www.epcc.pref.osaka.jp/center_etc/water/data_base/
- 大阪府(2004)：報道発表資料，「アマモ移植による都市型ダイビングスポットづくり」の開始
について(オンライン)，<http://www.pref.osaka.jp/fumin/html/05487.html>
- 大阪府水産試験場(1973)：昭和46年度大阪府水産試験場事業報告，pp.45-47.
- 大阪府水産試験場(1979)：昭和52年度大阪府水産試験場事業報告，pp.91-93.
- 大阪府水産試験場(1992)：平成2年度大阪府水産試験場事業報告，pp.43-45.
- 大阪湾再生推進会議(2004)：大阪湾再生行動計画，45p.
- 大阪湾再生推進会議(2005)：大阪湾再生に向けた市民参画による取り組み 参考資料，
pp.1-10(オンライン)，http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/suishin_h17/suishin_h17/04.pdf
- 金澤 剛，明松正二，多賀 博，稲田 勉(2005)：も場衰退海域におけるアマモ場再生試験
について，海洋開発論文集，pp.677-682.
- 金澤 剛・芳田利春・三宅亮志・出口一郎(2005)：大阪湾における海岸線とアマモ場の変遷
について，第33回環境システム研究論文発表会講演集，pp.337-342.
- 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)：アマモ場造成に
関する研究，電力中央研究所報告，総合報告：U14，231p.
- 環境省(2004)：藻場の復元に関する配慮事項，100p.
- 環境庁自然保護局(1994)：第4回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書(干潟，藻
場，サンゴ礁調査) 第2巻 藻場(オンライン)，
<http://www.biodic.go.jp/reports/4-12/r00a.html>
- 国土交通省近畿地方整備局神戸港湾事務所(2004)：神戸港の歩み，18p.
- 国土交通省近畿地方整備局(2011)：大阪湾環境データベース(オンライン)，
<http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/>
- 国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ(2003)：海の自然再生ハンドブッ
ク-その計画・技術・実践- 第3巻藻場編，pp.54-56.
- (社)全国漁港漁場協会(2003)：藻場造成型漁港構造物調査・設計ガイドライン，pp.31-32.
- 水産庁・(社)マリノフォーラム 21(2007)：アマモ類の自然再生ガイドライン，pp.3-3-3-16.
- 瀬戸内海水産開発協議会(1967)：瀬戸内海における藻場の現状，pp.34-35.
- 東京湾再生推進会議(2011)：東京湾のための行動計画第2回中間評価報告書，pp.32-33.
- 中辻啓二・藤原建紀(1995)：大阪湾におけるエスチャーリ循環機構，海岸工学論文集，第
42巻，pp.396-400.
- 前川行幸(2002)：アマモ場再生実験～アマモ場再生の重要性～，第2回英虞湾の再生を考え
るシンポジウム講演集，pp.11-15.
- 丸山康樹・五十嵐由雄・石川祐介(1987)：アマモ場適地選定手法「岸側の砂移動限界」，第

- 34 回海岸工学講演会論文集, pp.227-231.
- 第 5 管区海上保安本部海洋情報部：旧版海図(明治～昭和初期)(オンライン),
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN5/index.html>
- 中山茂雄(1999)：新訂港湾工学, 山海堂, pp.14-17.
- 南西海区水産研究所(1974)：瀬戸内海の藻場－昭和 46 年の現状－, pp.13-36.
- 南西海区水産研究所(1979)：沿岸海域藻場調査 瀬戸内海関係海域藻場分布調査報告－藻場の分布－, pp.31-76.
- 西宮市(1964)：西宮市史, 第 6 卷, pp.454-469.
- 長谷川剛基・前田瑛美・中辻啓二(2008)：大阪湾における生態系ネットワークに関する一考察, 平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, II-39.
- 兵庫県(1979)：第 2 回自然環境保全基礎調査 干潟・藻場・サンゴ礁分布調査報告書, 34p.
- 藤原建紀, 肥後竹彦, 高杉由夫(1989)：大阪湾の恒流と潮流・渦, 海岸工学論文集, 第 36 卷, pp.209-213.

第3章 アマモ場造成法の現地適用性の検証

3.1 概説

アマモ場が多様な各種機能を有し、水産上の有用性も含めて、広く自然環境および生態系の保全に極めて重要な役割を果たしていることが認識されるにつれ、失われてきたアマモ場を再生しようとする試みが各所でなされている。アマモ場を人為的に再生するあるいは造成する手法は、アマモが生育するのに適した場があることを前提に、栄養株の移植、苗の移植および播種の3つに大別できる（例えば、国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ，2003；水産庁・マリノフォーラム 21，2007a）。栄養株の移植では、既存のアマモ場から移植用の栄養株を採取する必要があるが、埋立工事等で消滅するアマモ場がある場合はそれを活用できるが、そうでない場合は近隣の健全なアマモ場からそのアマモ場に影響が出ない範囲で株を採取しなければならない。したがって、アマモ場の造成計画地によっては栄養株の入手が困難な場合も考えられる。また、既存のアマモ場に大きな負担をかけてしまう危険性も完全には拭えない。一方、苗移植は既存のアマモ場から種子を採取し、それをを用いて陸上の水槽で種苗生産を行い、ある程度まで生長させたアマモ苗を移植する方法である。栄養株移植に比較して、既存のアマモ場にかける負担は小さいといえる。しかしながら、種苗生産の規模の面から大規模なアマモ場造成への適用は困難である。播種法は既存のアマモ場から採取した種子をアマモ場造成計画地に播く方法であり、比較的大規模なアマモ場造成に適用が可能である。しかしながら、播種した種子の定着や発芽率を考えると、陸上で種苗生産をして苗を植える苗移植ほどは確実性に欠ける。このようにいずれの方法にも一長一短があり、確実なアマモ場造成にはそれぞれ工夫が必要である。

本章では、既往のアマモ場造成方法をレビューした後、確実なアマモ場造成を目指し、かつ大規模に造成が可能な方法として開発された「播種シート工法」(芳田, 1998)について述べるとともに、播種法では極めて重要な要素である播種するまでの間の健全なアマモ種子の取り扱い方法について述べる。そして、厳密には検討対象とした大阪湾ではないが、大阪湾に近くアマモが自生している海域である兵庫県明石市の東播海岸地先で実施した「播種シート工法」を用いた比較的大規模な実海域試験(芳田, 2002；金澤・森, 2003)について、設置後10年近く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明らかにした本アマモ場造成工法の有効性について示す。

3.2 アマモ場造成法

アマモ場造成法の中核となる播種・移植技術は既存の栄養株を採取して移植する栄養株移植，種から苗を育てて移植する苗移植および種子を播く播種法の3つに大別される。

栄養株移植は天然のアマモ場から栄養株を採取して移植する方法であり，移植時に栄養株に基質を付けない土なし法と基質ごと移植する土付き法がある。土なし法では，移植株の流失防止のためにアマモの地下茎に粘土を巻き付ける粘土結着法とアマモ株を竹串や割り箸などに輪ゴムで固定して海底に突き刺す竹串法が一般的である(図 3.2.1)。どちらもダイバーによって健全な栄養株を等間隔に植え付けるため，アマモ場造成予定水域に均一にアマモ株を移植することができ，株の活着率が高いのが特徴である。粘土結着法でのアマモ場造成事例としては，広島市南区似島の二階地先に造成された人口干潟前面でのアマモの移植事業が上げられる。本事例では平成3年から段階的にアマモの移植が行われ，アマモの分布範囲は移植後2～9年が経過した平成13年には移植面積の5000m²に対して3倍以上に拡大したと報告されている((社)マリノフォーラム21海洋環境保全研究会浅海域緑化技術の開発グループ，2002)。また，神奈川県金沢八景や千葉県三番瀬でのアマモ場造成などでも採用されている(水産庁・マリノフォーラム21，2007b)。一方，竹串法は横須賀市小田和湾の事例(川崎ら，1988)，徳島県阿南市橘湾の事例(国土交通省港湾局監修/海の自然再生ワーキンググループ，2003)がある。また，先述の神奈川県金沢八景でも使用されている。なお，土なし法における栄養株の採取は，少量の場合はダイバーがハンドスコープ等を用いて必要数を採取し，比較的大量に採取する場合は水中ポンプからの水流を利用して底質を掘り起こして採取するのが一般的である。

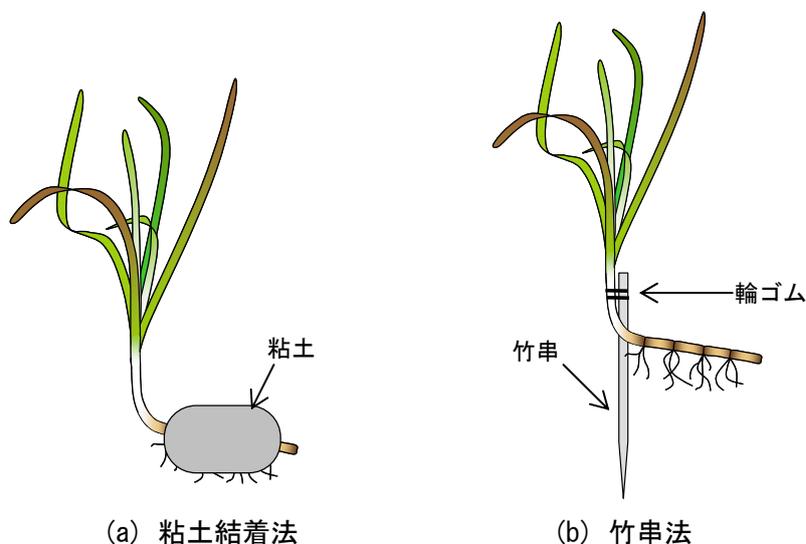


図 3.2.1 土なし法での株の流失防止策

土付き法では、アマモと周辺の土壌を芝生のようにマット状に採取して植える芝植え法と採取した数株程度を園芸用のポットに入れて植えるポット法がある。また、台船上に搭載したバックホウによって、アマモ株を周辺土壌ごと採取、移植する大規模な芝植え法もあり、さらにバックホウに専用装置を取り付けた移植方法も開発されている(中瀬・百瀬, 2002)。

また、上野ら(2003)、高山ら(2004, 2005)は播種・株植が不要なアマモ移植法として、天然のアマモ場にマットを敷設して、このマット上に落下した種子が自然に発芽生長した後、このマットを移植地に移設する方法を考案、三重県英虞湾で現地実験を実施している。

苗移植は、既存のアマモ場から採取した種子の保存から種苗生産までを陸上水槽で管理して、移植に必要なアマモ種苗を人工的に生産し、水ごけポット等を用いて移植する方法である。川崎ら(1988)の横須賀市小田和湾の事例では、6月に現地海域で採取した花枝を海水流水式の陸上水槽で一定期間通気培養し、花枝から放出された種子を収集し、食塩水を用いて比重 1.20 以上の良質種子を選別している。その後、種子を播種時期まで健全な状態で保存するには、種子保存期間が 3 ヶ月以内の場合は水温 10℃・塩分 50‰の条件、保存期間が 6 ヶ月の場合は水温 15~20℃・塩分 33‰の条件が好適であり、種子の発芽に適した塩分は 17~22‰、市販の川砂に腐葉土を混合すると発芽率が大幅に向上したと報告されている。さらに、発芽体の生長には水温 22℃が適しており、人工光の場合は照度 5Klux で 14 時間明期、10 時間暗期が好適であったとされる。こうした種苗生産には発芽体の生育や作業能率からポット苗方式による育苗法が、また移植法にはアマモ株の増加や残存率からポット苗による移植が好適であると示されている。また、山木ら(2007)は厳しい波浪条件下でのアマモ場造成を目指して、種苗移植基盤を考案し現地試験を実施している。現地試験に用いられた種苗移植基盤はエキスパンドメタル製の籠(500mm×500mm×50mm)で、内部に複数の種苗ポットを入れ、その周りに礫を入れて苗の流出を防ぐものである。岩手県越喜来湾浪板海岸のアマモ群落が見られない地点への種苗移植基盤を設置した結果、高波浪条件下でも基盤および移植アマモは安定し、成長と増殖が確認できたと報告されている。

播種は、既存のアマモ場から花枝を採取し、種子の採取と管理を陸上水槽で行い、アマモの発芽時期である冬季に直接造成現場に種子を播く手法である。特に船上からアマモ種子を播く直接播種は、岡山県日生町で 1985 年から比較的大規模に行われた(福田・佐藤, 1987)。造成地としては基準面からの水深が 2m 以浅の場所で、以前アマモが生えていた場所、潮流により泥や砂の移動があまりない場所を選び、水温が 16℃以下となる 11 月中旬ごろに潮流がとまった時間帯に船を微速で移動させながら、船上から手で出来るだけ均一となるように 1m² 当たり 20~30 粒の種子が散布された(福田, 1987)。一方で、播種法は環境条件によっては発芽率・定着率が一定しないという問題もあるため、種々の播種法が開発されている。コロイダルシリカ法は、種子の流出を防ぐため二酸化珪素のコロイド溶液であるコロイダルシリカに種子を混ぜて種子を播く方法で、横浜市地先で実施した結果では同時に実施した他の播種方法よりも発芽生長ともにより結果が報告されている(工藤ら,

2003). 先述の岡山県日生町では直接播種のほかにコロイダルシリカ法も行われており、更には生分解糸と綿糸を混紡した厚さ約 2.5cm の袋体に、砂泥などの詰め材とアマモ種子を混合して注入し、海底に設置する土のう式播種マット法も行われている(大本ら, 2005). こうした袋状あるいはマット状のものにアマモ種子を用土と肥料などとともに入れる手法も各所で提案されているようである. 團ら(1998)は 30cm×30cm のガーゼ袋の中にアマモ種子と川砂と腐葉土を 7 対 3 の割合で混合したものを入れて播種袋を作成するとともに、砂泥の移動を緩和させてアマモの発芽と生育を助長するために、直径 1mm のポリプロピレン繊維をヘチマ構造状に加工した半透過性構造の網にエキスパンドメタルを融着させた底質安定化マットを開発し、海底に並べた播種袋の上にこの底質安定化マットを設置している.

このように、栄養株移植、苗移植および播種法ともにそれぞれ特徴があり、より確実なアマモ場の造成のために各種の開発がなされている. しかしながら、台船上に搭載したバックホウによってアマモ株を周辺土壌ごと採取、移植する芝植え法(中瀬・百瀬, 2002)以外は、いずれも大規模な造成に適用するにはコストや労力の面で現実的であるとは言い難い. 一方、機械式の芝植え法は、埋立工事等で消滅するアマモ場を代替地に移植する場合は良いが、そうでないアマモ場から栄養株を採取するにはアマモ場に掛ける負担が大きく、これも現実的であるとは言いがたい. そこで、既存のアマモ場に与える影響が小さい播種法を採用し、大規模なアマモ場造成への適用が可能で、かつ播種した種子が海底で確実に定着する「播種シート工法」が芳田ら(1998, 1999)および寺田ら(2000)によって提案されている.

3.3 播種シートによるアマモ場造成法

従来のアマモ場造成法がダイバーによる多大な水中作業を要し、コスト的にも割高となつて大規模なアマモ場造成のニーズには応えられないことを鑑み、芳田ら(1998)はアマモ種子を付着させた「播種シート」を海底に敷設する播種シートによるアマモ場造成法を提案している。ここで特徴的なのが、埋立地造成工事において波浪や潮流によって捨石の隙間から埋立土砂が流出するのを防ぐために防砂シートが捨石マウンドに敷設されるが、その時に用いられる機械式シート敷設工法(写真 3.3.1)を応用して、鋼製等の芯材に巻きつけたロール状の播種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、敷設して、ダイバーによる水中作業を極力減らそうと考えていたことである(図 3.3.1)。



写真 3.3.1 機械式シート敷設工法(写真提供：東洋建設株)

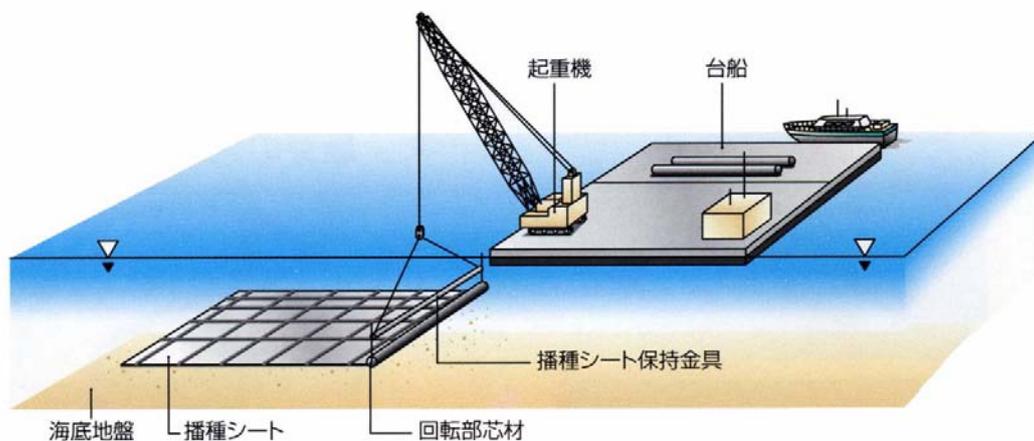


図 3.3.1 播種シートによるアマモ場造成法イメージ図

芳田ら(1999)はこの播種シートの主要素材としてアマモの根の生長や海域環境に対する影響を考え、生分解性あるいは自然素材を使用した。シート素材がアマモ種子の発芽および成長に及ぼす影響を確認するため、アセテートの不織布とヤシ繊維でできた不織布状のマット(ヤシマット)を用いて室内発芽試験が実施された。播種シートはアマモ種子の陸上作業中の乾燥を防ぐため、保水性・粘着性のある CMC(カルボキシメチルセルロース)5%溶液に浸した後、アマモ種子を 50 粒ずつアセテートおよびヤシ繊維上に一様に塗布して製作し、実施工での工程を考えて室内で 1 日乾燥させたものを使用した。室内発芽試験の方法は、500ml のビーカーに砂泥を 1cm の厚さで敷き詰めて播種シートを載せ、その上に 5mm の厚さで覆土し、覆土表面から 3cm 冠水させた状態で水温を 12°C に保って 1 週間ごとに発芽数を計測した。その結果、アセテートおよびヤシ繊維を用いた場合の発芽率はシートがない場合とほぼ同一であり、12 週後に計測した葉長や根の長さといった生長の度合いでもシートの悪影響は認められず、シートがアマモの発芽・生長の阻害要因になることはないとの結論を得た。また、播種シートの構造を決めるため、アマモ種子を 2 枚のシートで挟み込んだ実験も実施され、図 3.3.2 に示すように発芽率は、アセテートおよびヤシ繊維ともにアマモ種子と被覆砂との間にシートが介在しても影響はほとんどないことがわかった。ただし、アセテートの場合、葉はいずれも上部のシートを貫通したが、根が下部のシートを貫通したものは僅かで、残りはシート間を這うように伸びた。一方、ヤシ繊維では根は下部シートを貫通したが、葉が上部シートに遮られているものもあった。これより、上部にアセテートのような不織布、下部にはヤシ繊維からなるヤシマットが播種シートの基本構造となった。

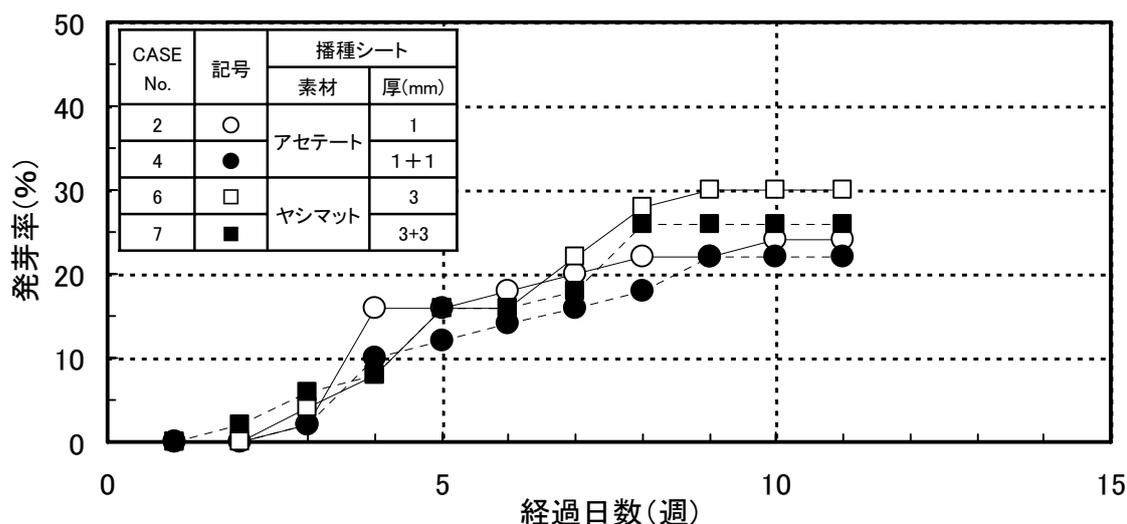


図 3.3.2 播種シートの形状(芳田ら, 1999)

3.4 アマモ種子の養生・保存

3.4.1 既往の方法と課題

播種シートに使用するアマモ種子は既存のアマモ場から採取し、陸上での養生後、播種シートを製作、敷設するまで良質な状態で保存しておく必要がある。川崎らは(1988)はアマモ種子の採取から保存に至る過程を示している。それによれば、アマモの花枝の採取適期は、春から夏に掛けての開花・結実期で、現地の観測で花穂の中の種子が結実し放出された始めた段階で採取すれば効率よく採取できる。採取したアマモの花枝は、20~30本束にしておもりをつけて海水流水式の通気した培養水槽に投入し、種子が放出されるまで培養する。アマモ種子は比重が大きいほど発芽率が高いため、食塩水を用いて比重1.20以上の成熟した良質種子を選別する。アマモ種子の保存においては、アマモ種子の発芽抑制や死亡率は主に水温と塩分が関与していることから、種子保存期間が3ヶ月以内の場合には水温10℃・塩分50の条件、6ヶ月の場合には水温15~20℃・塩分33が好適と報告されている。

一方、芳田ら(1999)はアマモ種子の越年保存を目指し、海水中で養生後に比重選別した種子を用いて、温度を20℃、5℃、-2℃の3条件、塩分を30‰、50‰の2条件の各保存条件で1年間保存した結果、20℃および5℃で保存した場合はいずれも種子は腐敗したが-2℃で保存した場合は健全性を保ち、特に水温-2℃、塩分50‰の保存条件が好適であったと報告している。

ところで、写真3.4.1のようにアマモの花穂の中で成熟した種子はやがて海底に落ちるが、風浪によりアマモの花枝が切れて流れ藻となり、花枝や花穂が海面を漂うこともある(写真3.4.2)。そして漂いながらも光合成を行って栄養分を未熟な種子に補給し、種子を成熟させ、順次その浮遊海域に種子を落とし、その生育範囲を拡大する。この海面を漂いながらも種子に栄養分を補給する過程を追熟というが、成熟したアマモ種子を収集・保存するまでの養生において、この追熟の効果はよくわかっていない。そこで、成熟したアマモ種子が入った花穂のみを採取するのと、地下茎の根元から花枝を引き抜く2種類のアマモ種子の採取法により得たアマモ試料を用い、花穂や花枝を水槽内にそのまま投入して水面に浮かべる養生法と、ネット(網袋)に入れて水面下に沈下する養生法を試みて、追熟の効果を加味したアマモ種子を得るのに適した採取法および養生法を検討した。また、従来のアマモ種子の養生・保存法は基本的に良質な海水が使用できることを前提としているが、場所によっては良質な海水を使用することが困難な場合も有り得る。そこで、鑑賞魚用の人工海水の可能性も含めて、養生・保存を行う際に使用する海水の違いによる影響についても検討した。以下にアマモ種子の採種法、養生法および保存法について、順に述べる。



写真 3. 4. 1 アマモの花穂・種子



写真 3. 4. 2 アマモ花枝・花穂の流れ藻

3.4.2 アマモ花枝と花穂の採取

アマモの花枝は写真 3.4.3 および写真 3.4.4 に示す姫路市白浜海岸のアマモ場で 2003 年 6 月 1 日に、ダイバーにより水中で花枝を地下茎から引き抜いて採取した。採取した花枝は容器内の温度が上がらないよう保冷剤を入れ、乾燥させないようにその日のうちに明石市江井ヶ島港に設置した流下水槽内に投入した。

アマモの花穂採取は写真 3.4.5 および写真 3.4.6 に示す赤穂市海浜公園前のアマモ場で 2003 年 6 月 16 日の干潮時に行った。このアマモ場は水深が浅いため、写真 3.4.7 に示したように胴長でアマモ場に入って花枝を探し、花穂をみて種子が浮き上がり、ほぼ成熟していると思われるものを採取した。採取した花穂は、花枝と同様に乾燥と温度に注意してその日のうちに江井ヶ島港に搬送した。また、同時に室内実験用の花枝の採取も実施した。



写真 3.4.3 姫路市白浜海岸の位置



写真 3.4.4 姫路市白浜海岸



写真 3. 4. 5 赤穂市海浜公園位置図



写真 3. 4. 6 赤穂市海浜公園前の海岸



写真 3. 4. 7 アマモの花穂採取

3.4.3 アマモ種子の養生法の検討

アマモ種子を養生する場合、比較的少量の種子であれば水温や海水をろ過するなどの質を管理した比較的小規模の養生が可能であるが、大量のアマモ種子を養生する場合、水温等を管理することはなかなか難しい。そこで、アマモ種子の養生を比較的規模の小さい室内養生と規模の大きい屋外養生とに分けて、それぞれ適した養生法を見出すことを目的に実施した。試験ケースを表 3.4.1 に示す。すなわち、A-1～D-2 は東洋建設株式会社鳴尾研究所の実験室内に設置した小型コンテナ(写真 3.4.8)を用いて、花穂と花枝といった採取方法の違いと養生に使用する海水の違いに着目した。一方、E-1～3 は江井ヶ島港(明石市)に設置した屋外水槽(写真 3.4.9)に目の前の海水をかけ流して花穂と花枝といった採取方法の違いと、ネット(養生袋)に入れて沈設させるのとそのまま浮遊させるといった養生方法の違いに着目した。

表 3.4.1 アマモ種子養生試験ケース

Case No.	使用海水	種子産地	養生部位	養生法			養生場所
				状態	海水	水温(°C)	
A-1	明石ろ過海水	赤穂	花枝	浮遊	循環	25	東洋建設(株) 鳴尾研究所室内
A-2			花穂				
B-1	人工海水		花枝		循環		
B-2			花穂				
C-1	明石ろ過海水		花枝		止水		
C-2			花穂				
D-1	鳴尾ろ過海水		花枝		循環		
D-2			花穂				
E-1	江井ヶ島自然海水	赤穂	花穂	ネット	流水	18～22	江井ヶ島港屋外水槽
E-2		姫路	花枝				
E-3			花枝				



写真 3.4.8 室内での循環養生



写真 3.4.9 海水流下式養生水槽

東洋建設株式会社鳴尾研究所の実験室では、表 3.4.1 に示した A-1~D-2 のケースのため、使用海水別に 4 つの小型コンテナ(写真 3.4.8)を用意して赤穂市海浜公園前で採取したアマモの花穂と花枝をそれぞれ 108g と 463g ずつ入れた。A は明石で採水し、ろ過した海水を循環させたケース、B は人工海水を循環させたケース、C は明石のろ過海水を循環させずに止水状態としたケース、D は比較的きれいな海水の入手が困難な場合に対応して港湾域である西宮市鳴尾浜で採水し、ろ過した海水を循環させたケースである。養生水温は室温を 25℃に設定することで、ほぼ 25℃を保った。実験室内の調光は行わず、ガラス窓からの自然光のみとした。ただし、直射日光は当てていない。花穂と花枝を採種した 2003 年 6 月 16 日に養生を開始して 2 週間もするとコンテナの底に落ちた種子が多く見られるようになり、3 週間後には花穂と花枝はほぼ茶色に変色した(写真 3.4.10, 3.4.11)。養生期間中、止水条件とした D の海水は 3~4 日程度で濁りと異臭が生じたため、その都度海水交換を繰り返した。その他の 3 種の海水には濁りは生じなかったが、養生開始 17 日目には全て海水を交換した。養生を開始して 25 日目の 7 月 11 日にアマモ種子を雑物から分離して採種を実施した(写真 3.4.12)。ケースごとに採種した種子の総質量を測定した結果を表 3.4.2 に示す。また、それぞれの種子を写真 3.4.13 に示す。表 3.4.2 によれば、養生対象部位が花枝および花穂の両方ともに海水を止水状態で養生したケース C で採種した種子の総質量が小さい。一方、海水を循環させて養生した他のケース(A, B, D)では、使用海水が異なっても採種した種子質量は似た値を示している。写真 3.4.13 によれば、海水を止水状態で養生したケース C だけが種子が白っぽい色をしており、成熟が進んでいないように見える。こうしたことから、アマモ種子の室内養生においても、種子の追熟を促進して多くの種子を採種するためには、海水あるいはアマモ種子の劣化を防ぐために海水を循環させて養生する必要があるといえる。

表 3.4.2 室内養生による回収種子総量(2003/7/11 計測)

Case	使用海水	種子産地	養生法			採種種子質量(g)	
			状態	海水	水温(°C)	花枝	花穂
A	明石ろ過海水	赤穂	浮遊	循環	25	38.88	13.69
B	人工海水			循環		38.86	17.29
C	明石ろ過海水			止水		23.42	9.81
D	鳴尾ろ過海水			循環		39.46	13.61



写真 3. 4. 10 室内養生 3 週間後の花枝



写真 3. 4. 11 室内養生 3 週間後の花穂



(a) 枯れ茎等の除去



(b) 集積

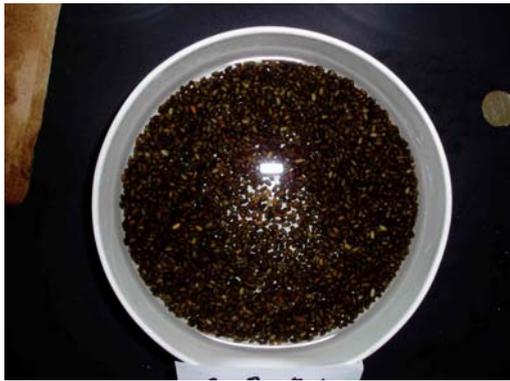


(c) 選別前

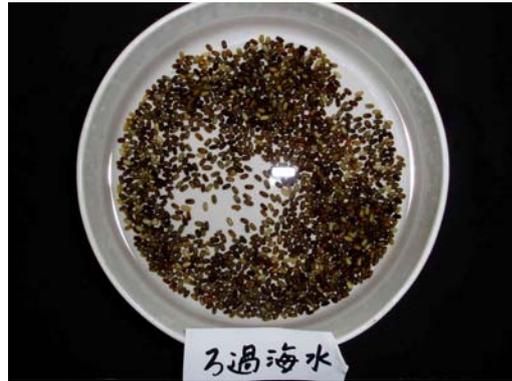


(d) 雑物を洗い流した選別後

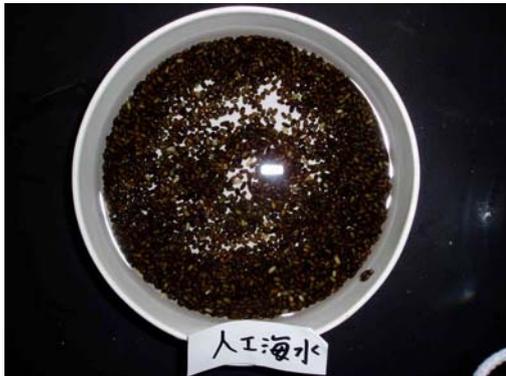
写真 3. 4. 12 養生後の採種作業



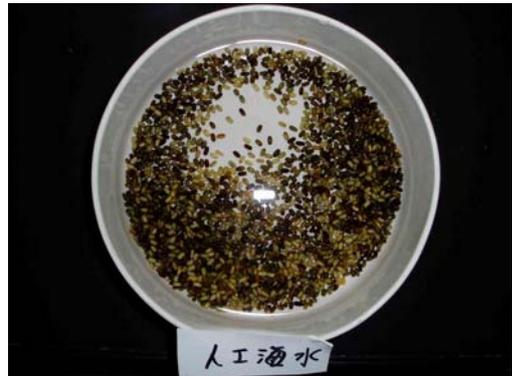
(a) A-1(明石ろ過海水；花枝)



(b) A-2(明石ろ過海水；花穂)



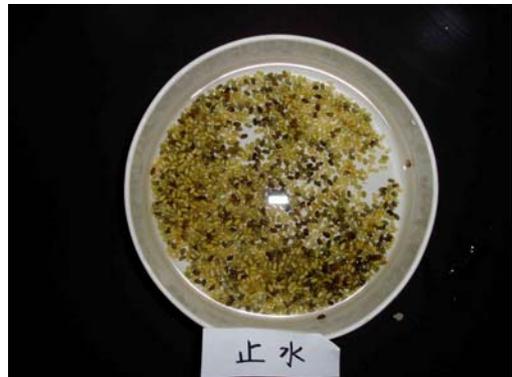
(c) B-1(人工海水；花枝)



(d) B-2(人工海水；花穂)



(e) C-1(止水；花枝)



(f) C-2(止水；花穂)



(g) D-1(鳴尾ろ過海水；花枝)



(h) D-2(鳴尾ろ過海水；花穂)

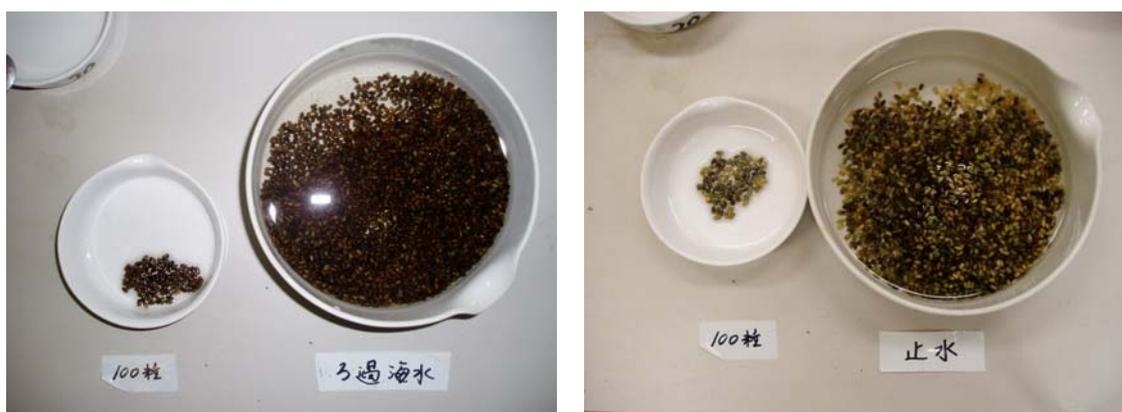
写真 3. 4. 13 養生後の種子

このように雑物を取り除いたアマモ種子は、その後も同様の養生を続けた後、2003年8月3日に水温7°Cでの保存を開始した。海水の状態はろ過海水を使用したケース(A, C, D)の種子は明石のろ過海水を循環し、人工海水のケースBはそのまま人工海水を循環させた。保存は同じ実験室内の室温を7°Cに設定した恒温庫で実施した。

なお、保存開始にあたって、各ケースの種子を無作為に100粒ずつ選び、100粒種子質量を測定した。その結果を表3.4.3に示す。この時点でも、海水を止水状態で養生したケースCの種子は全体に白っぽい色をしていたが、100粒種子質量は他のケースと遜色ない。これは雑物を取り除く過程で、軽い種子も同時に取り除かれた結果であると考えられた。採取部位に着目すると、花枝を採取した方が花穂を採取するよりも100粒種子質量が重く、種子の追熟性が良いようである。海水の状態に着目すると、人工海水を使用した場合がやや劣るようであるが、大きな差ではない。写真3.4.14に海水を循環させて養生したケースAと止水状態で養生したケースCについて計量した100粒の種子の写真を示す。

表 3.4.3 室内養生による100粒種子質量(2003/8/3計測)

Case	使用海水	種子産地	養生法			100粒種子質量(g)	
			状態	海水	水温(°C)	花枝	花穂
A	明石ろ過海水	赤穂	浮遊	循環	25	1.078	0.992
B	人工海水			循環		1.027	0.992
C	明石ろ過海水			止水		1.042	1.008
D	鳴尾ろ過海水			循環		1.052	1.037



(a) A-1(明石ろ過海水; 花枝)

(b) C-1(止水; 花枝)

写真 3.4.14 計量した100粒の種子

水温 7°Cでの低温保存後の 2003 年 10 月 14 日に室内発芽試験を開始した。室内発芽試験はケースごとに 500ml のビーカーに、赤穂市海浜公園前でアマモ種子採取と同時に採取しておいた底質を厚さ 3cm 程度に敷き詰め、その上に比重 1.2 の塩水を用いて比重選別したアマモ種子 100 粒を出来るだけ均等となるように配置し、その上に底質を 1cm 程度の厚さで被せたのち、ろ過海水を 500ml の線まで入れて蒸発防止のためのラップを掛けて、周囲がガラス張りの恒温庫に入れた(写真 3. 4. 15)。この恒温庫も同じ実験室内の直射日光が当たらない場所に配置してあり、恒温庫内の温度は 12°Cに設定した。なお、比重選別の結果(残存率)を表 3. 4. 4 に示す。海水を止水状態で養生したケース C を除いて花枝を養生して採種した種子は、花穂を養生して得た種子よりも残存率が高い。これからも花枝を養生するのが好ましいといえる。なお、港湾域である鳴尾のろ過海水で養生したケース D は回収種子質量や 100 粒種子質量は比較的良かったものの、この比重選別の結果はあまり良くない。A、C および D の保存は同一の水槽内で実施したため、D だけ保存条件が異なっていたとは考えられず、この原因は不明である。



写真 3. 4. 15 室内発芽試験開始時の状況

表 3. 4. 4 室内養生・保存後の比重選別の結果(2003/10/14 計測)

Case	種子産地	養生法				保存法			比重選別残存率(%)	
		使用海水	状態	海水	水温(°C)	使用海水	海水	水温(°C)	花枝	花穂
A	赤穂	明石ろ過海水	浮遊	循環	25	明石ろ過海水	循環	7	81	50
B		人工海水		循環		人工海水			88	63
C		明石ろ過海水		止水		明石ろ過海水			80	87
D		鳴尾ろ過海水		循環		明石ろ過海水			64	46

図 3.4.1 に室内発芽試験の結果を示す。いずれのケースも試験を開始して 30 日程度経過すると、発芽率が安定してくる傾向にある。海水を止水状態で花穂を養生した◆(C-2)の発芽率がやや高く、明石のろ過海水を循環させて花穂を養生した●(A-2)の発芽率が突出して低いが、他のケースの発芽率は 20%程度に分布している。花枝と花穂の養生部位の違いで見ると、若干花穂を養生して得た種子の発芽率が良い。なお、発芽試験終了時の各ケースの状況を示した表 3.4.5 でわかるように、鳴尾のろ過海水で花枝を養生して得た□(D-1)は発芽数こそ他のケースと同等であるが、発芽後の生長が悪く、枯死したと思われるものも多かった。表 3.4.4 に示した比重選別の結果の悪さに関連して、何らかの原因で種子の健全性が損なわれた可能性があるが原因は定かでない。

発芽試験終了後に、アマモ苗を抜き取って洗浄し、炉乾燥を行った後に室温に戻して乾燥質量を求めた。図 3.4.2 に 1 本あたりの乾燥質量を示す。発芽率が高かった海水を止水状態で花穂を養生した C-2 は 1 本あたりの乾燥質量も重く、発芽率が低かった明石のろ過海水を循環させて花穂を養生した A-2 は 1 本あたりの乾燥質量は軽い。また、比重選別の結果が悪く、発芽後の生長も悪かった鳴尾のろ過海水で養生した D のケースも 1 本あたりの乾燥質量が軽い傾向にある。明石のろ過海水で花枝を養生した A-1 や人工海水で花枝を養生した B-1 は、発芽率は全体から見れば平均をやや下回っているように見えるが、1 本あたりの乾燥質量は比較的軽く、優良な苗が育っていたものと判断される。

このように、比較的小規模にアマモの種子を採取・養生・保存する場合について、採取部位や養生条件を変化させて、適切な養生法を見出すことを試みた。それぞれの段階で種子の質量や発芽率などに若干の優劣が見られたが、総合的に見て、微生物による悪影響を防ぐため、出来るだけ不純物を含まない清浄な海水を循環してアマモの花枝を養生することが良質な種子を多く入手できる方法であるといえる。また、人工海水の使用も特に問題はなく、自然海水の入手やろ過の手間を考えると十分使用に値すると考えられた。

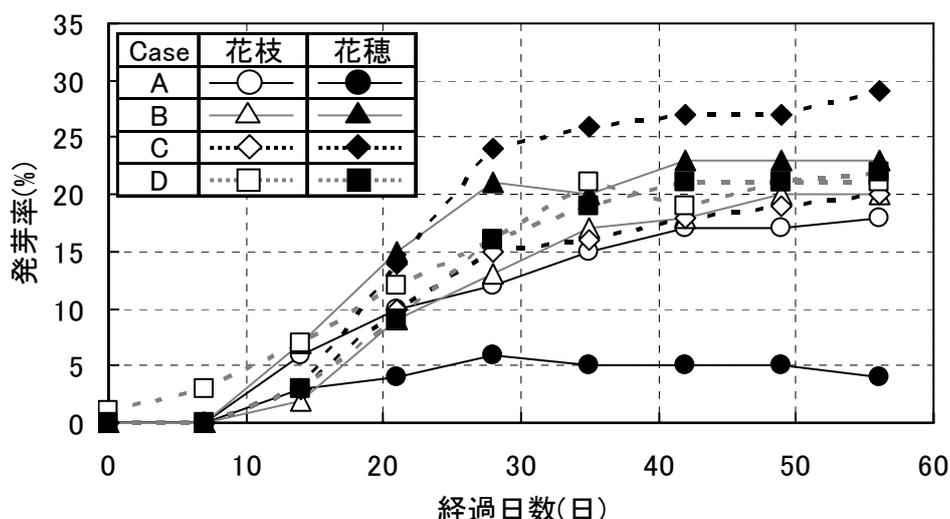


図 3.4.1 発芽率の変化(室内養生)

表 3.4.5 発芽試験終了時状況一覧

	養生海水			
	明石ろ過海水	人工海水	明石ろ過海水(止水)	鳴尾路か海水
花枝養生				
花穂養生				

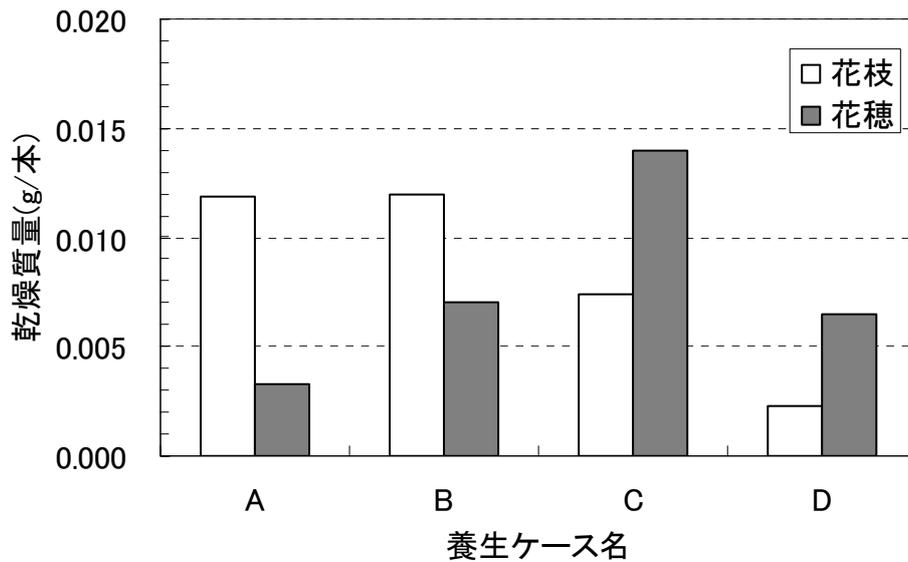


図 3.4.2 1本あたりの乾燥質量(室内養生)

次に、比較的規模の大きい屋外養生に対する養生法の検討結果を記す。屋外養生に対する養生法の検討は、表 3.4.1 の E-1~3 を対象に、江井ヶ島港(明石市)に設置し目の海水をかけ流した海水流下水槽(幅 2m×長さ 5m×高さ 0.9m；写真 3.4.9)を用い、ここでも花穂と花枝といった採取方法の違いと、ネット(養生袋)に入れて沈設させるのとそのまま浮遊させるといった養生方法の違いに着目した。

この海水流下水槽へは、2003 年 6 月 1 日に姫路市白浜海岸で採取した花枝の一部および 2003 年 6 月 16 日に赤穂市海浜公園前で採取したアマモの花穂を網目 2mm の網袋に入れ、写真 3.4.16 のように水中に沈めて養生した。姫路市白浜海岸の花枝の残りは、写真 3.4.17 に示すようにそのまま水面に浮かべて養生した。アマモ種子を採種するまでの養生期間中、網袋に微生物が付着して袋内の通水が阻害されないよう、また、花枝が水面上に出て乾燥しないように管理した。養生中のアマモの花枝は生きており、水中および袋の中でも花が咲いて、花粉がみられた(写真 3.4.18)。しかし、2~3 週間程度経過すると袋内の花穂と花枝は次第に腐敗臭がするようになり、水面に浮かんでいた花枝も沈んでいった。これより、アマモ種子への栄養分の補給はもはやないと判断して花穂から落ちたアマモ種子を採種した。採種直前の花枝の状態を写真 3.4.19 および写真 3.4.20 に示す。採種作業では細かな花穂や花枝などの雑物とともに比重が軽くて白い未成熟なアマモ種子も流したが、その流出量は水面養生のものより網袋による水中養生の方が多かった。網袋内で養生し採種したアマモ種子と水面で養生し採種したアマモ種子を写真 3.4.21 に示す。写真 3.4.21 においてアマモ種子の色を比較すると、水面養生のものは黒いのに対し、水中養生のものは白っぽく未だ成熟していないようにみえた。アマモ種子の表皮の色は成熟するにしたがい、通常は白色→茶褐色→黒褐色に変化する。この表皮の色から判断すれば、養生法としては水面に浮かべる方法が網袋による水中養生法よりも良いといえる。これは、網袋の場合は網目の目詰まりなどにより十分な通水ができず酸素不足になること、網袋の中には十分な太陽光が届かずに光合成ができ難いため追熟が進まなかったためと考えられた。



写真 3.4.16 網袋による水中養生



写真 3.4.17 水面養生



写真 3. 4. 18 養生中に見られた花粉(黄色くみえるもの)



写真 3. 4. 19 網袋での養生終了時の花枝



写真 3. 4. 20 水面養生終了時の花枝



(a) 水中養生のアマモ種子



(b) 水面養生によるアマモ種子

写真 3. 4. 21 回収されたアマモ種子

採種したアマモ種子は、2003年7月25日に江井ヶ島港から持ち帰り、容積1Lの広口びんに300~400g(約30,000~40,000粒)を入れ、設定温度7℃の恒温庫で保存した。約50日経過した10月2日に室内発芽試験のため、それぞれの養生法で得たアマモ種子から10gずつを計り取り、比重1.2の食塩水により比重選別を行った。比重選別の結果(残存率)を表3.4.6に示す。残存率をみると、花穂のネットによる水中養生のケース(E-1)と花枝の水面浮遊養生のケース(E-3)では68%と同じ値である。一方、花枝のネットによる水中養生のケース(E-2)の残存率は42%と他の2ケースより小さい。この同じ姫路市白浜海岸で採取した花枝を用いたE-2とE-3の残存率の差異より、無作為に採取した花枝を水面養生することにより追熟の効果はあるといえる。そして、同一産地および同時期の採取ではないが、追熟の効果は成熟しているかどうかを確認して採取した花穂と同程度まで残存率を上昇させたと考えられた。

表 3.4.6 屋外養生・保存後の比重選別の結果(2003/10/2計測)

Case	種子産地	養生法					保存法			比重選別 残存率(%)
		部位	使用海水	状態	海水	水温(℃)	使用海水	海水	水温(℃)	
E-1	赤穂	花穂	江井ヶ島 自然海水	ネット (水中)	流水	18~22	江井ヶ島 ろ過海水	止水	7	68
E-2	姫路	花枝		浮遊						42
E-3		花枝		68						

室内発芽試験は、室内養生のアマモ種子の場合と同様に、それぞれのケースのアマモ種子100粒ずつを用い、1Lビーカーで実施した(写真3.4.22)。アマモ種子を播種した1Lビーカーは、直射日光が差し込まない室内に置き、庫内温度を12℃に設定したガラス張りの恒温庫に入れて(写真3.4.23)、発芽試験を実施した。

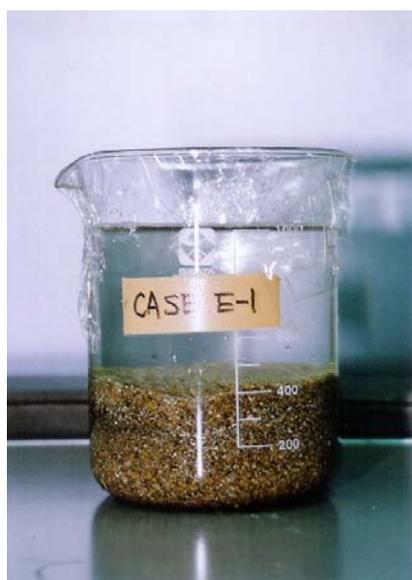


写真 3.4.22 室内発芽試験の試験体



写真 3.4.23 ガラス張り恒温庫

発芽試験終了時の状態を写真 3.4.24 に示す。また、図 3.4.3 に発芽率の変化を示す。いずれのケースも試験を開始して 30 日程度経過すると発芽率が安定してくる傾向にあるのは、室内養生の種子の場合と同じである。しかしながら、40 日を越えたあたりから再び発芽率が向上しているケースもあり、室内発芽試験の期間として 30 日は目安ではあるが十分ではないといえる。個別にみると、花穂のネットによる水中養生の種子(E-1)は発芽が遅く、発芽率も小さいのが特徴的である。また、花枝を養生した E-2 と E-3 を比較すると、大きな差異はないものの水面養生の E-3 がネットの水中養生の E-2 よりも発芽率が良い。これより、比重選別をしたアマモ種子による結果であるが、発芽率に関して水面養生により追熟した花枝のアマモ種子が最も優れているといえる。なお、これら屋外養生によるアマモ種子の発芽率は、図 3.4.1 に示した室内養生によるアマモ種子の発芽率より 2 倍以上良いことは注目すべき結果であり、屋外養生の優位性を顕著に表している。この室内養生に対する屋外養生の優位性は、屋外養生では種子の追熟時に日光の直射を受けたこと、常に新鮮な海水を掛け流したことによると考えられた。

また、室内養生種子の発芽試験と同様に、発芽試験終了後に発芽生長した苗を抜き取り、炉乾燥を行って乾燥質量を求めた。図 3.4.4 に 1 本あたりの乾燥質量を示す。ここでも、花枝を水面養生した E-3 の値が高く、この養生法の優位性が示された。なお、これら 1 本あたりの乾燥質量を図 3.4.2 の室内養生のものと比較すると、発芽率ほどの差異はない。したがって、室内養生した種子も発芽さえすれば、その後は順調に成長するものと期待される。

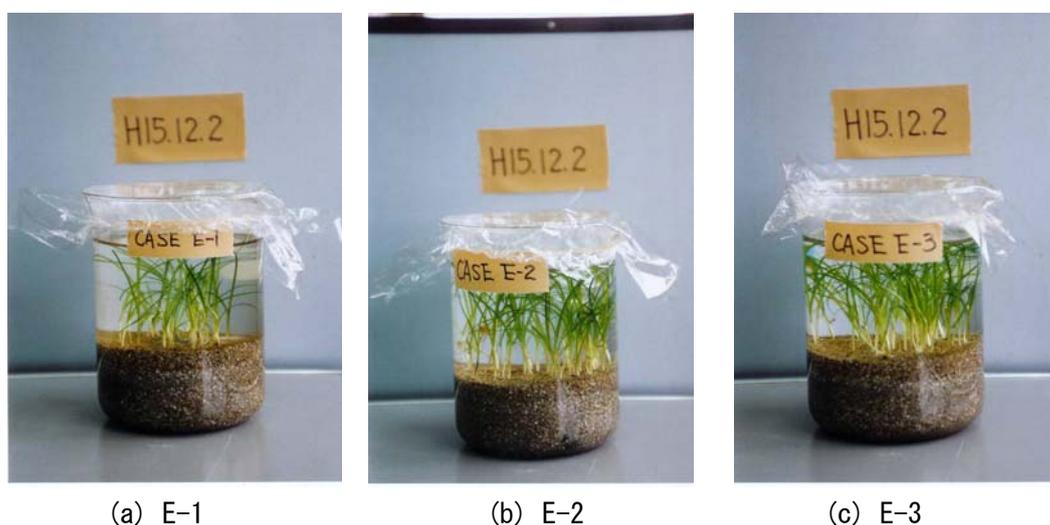


写真 3.4.24 室内発芽試験終了時の発芽生育状況(屋外養生)

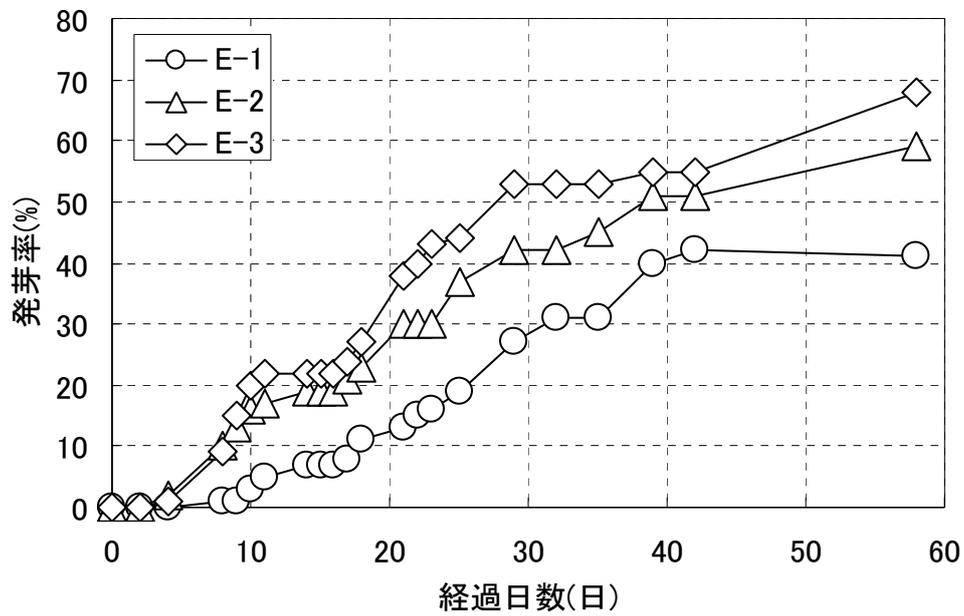


図 3.4.3 発芽率の変化(屋外養生)

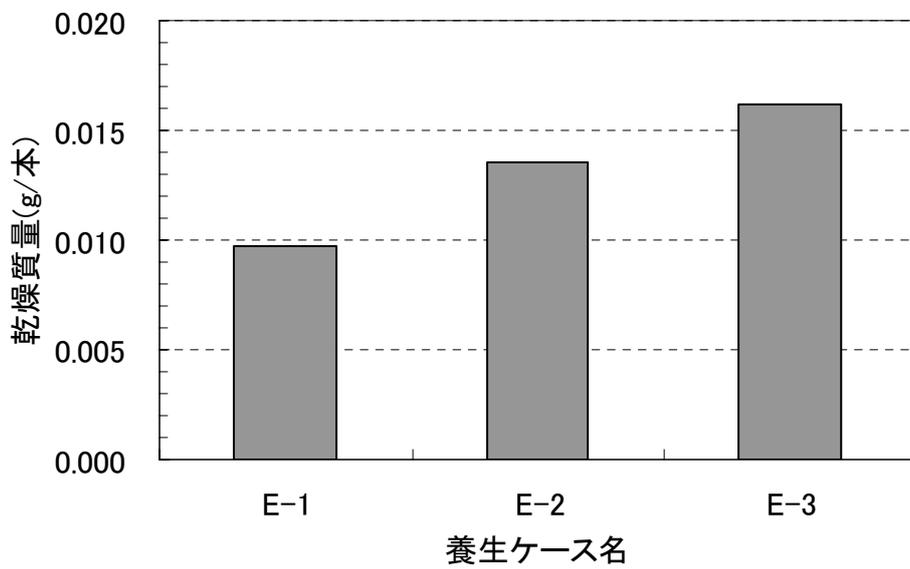


図 3.4.4 1本あたりの乾燥質量(屋外養生)

3.4.4 アマモ種子の保存法の検討

採取した花枝を養生した後に集めたアマモ種子をアマモ場造成に使用するまでの間、アマモ種子を良質な状態で保存する必要がある。そこでアマモ種子の保存に適した条件を検討するため、以下の条件を変えて試験を行った。

①保存水温

これまでの研究成果(川崎ら, 1988)で 10℃あるいは 15～20℃が適しているとされている保存水温の確認。

②曝気(エアレーション)の有無

保存中、海水中に発生する好気性微生物による溶存酸素が減少する影響の検討。

③抗菌タイプの活性炭使用

海水中の好気性微生物の働きを抑制するため、水質浄化に用いられる通常のものでなく、微生物が忌避する物質を溶出する抗菌タイプの活性炭を用いた場合の有効性に関する検討。

④保存水の塩分

微生物の働きを弱めるための高塩分時のアマモ種子の耐性確認。また、低塩分時に報告されているアマモ種子の発芽促進効果(川崎ら, 1988)の確認。

⑤保存水質の影響

自然海水のろ過海水でなく、無菌で栄養塩類を含む人工海水、清浄で栄養塩を多量に含む海洋深層水(鹿児島県甌島沖で採水)を用いた場合の、それらの有効性の検討。

これより選定した試験ケースを表 3.4.7 に示す。

表 3.4.7 アマモ種子保存試験ケース

CASE NO.	使用海水	塩分 (psu)	水温 (°C)	曝気 (エアレーション)	活性炭 (粒状態)	摘要		
1	江井ヶ島ろ過海水	30(未調整)	0～5	無	通常	氷温	保存水温の影響	
2			5～10			基本条件		
3			10～15			高温1		
4			15～20			高温2		
5		5～10	20	有	抗菌	曝気効果		
6						活性炭の効果		
7						低塩分	CASE NO.2を含め 保存水塩分濃度の影響	
8						高塩分		
9						人工海水	人工海水	CASE NO.2を含め 保存水水質の影響
10						海洋深層水	海洋深層水	

試験に用いたアマモ種子は、2003年6月16日に赤穂市海浜公園前のアマモ場で採取した花穂を7月25日まで江井ヶ島港(明石市)の海水流下水槽でネットに入れて水中養生したものをを用いた。養生後、室内の恒温庫(庫内温度7°C)でしばらく保存し、8月12日に室内発芽試験用として各試験ケースにつき10g(約1,000粒)を計量し、ガラス容器に入れて各試験ケースそれぞれの保存条件で室内発芽試験時まで保存した。ここで、ガラス容器に入れた海水量は500ml、活性炭使用量は0.5gとした。保存状況を写真3.4.25に示す。

保存期間は10月2日までの約50日間で、期間中、エアレーションは断続的に行った。保存期間終了時点では、海水中に好気性微生物が発生して全てのケースで海水は白濁していた。無菌の人工海水および清浄な海洋深層水でも同じであり、現状の保存手順では種子に付着した微生物の繁殖は避けられない。抗菌タイプの活性炭は、海水500ml中0.5gの使用量では微生物の働きを抑制できなかった。また、設定水温が10~15°CのCASE NO.3では既に発芽しているものが多く(写真3.4.26)、これは保存した水温が発芽の適温に近かったためと考えられた。さらに、低塩分としたCASE NO.7では、容器内一面に発芽しており、川崎ら(1988)が報告している低塩分による発芽促進効果が確認された。



写真 3. 4. 25 アマモ種子保存状況



写真 3. 4. 2 保存期間終了時の状況

アマモ種子の養生法の検討と同様に、保存してきたアマモ種子を比重選別し、比重 1.2 以上のアマモ種子重量を測定した後に庫内温度 12℃のガラス張り恒温庫で室内発芽試験を行った。室内発芽試験の結果を以下に記す。

①保存水温の影響(CASE NO.1～CASE NO.4)

比重 1.2 以上のアマモ種子残存率を表 3.4.8 に示す。保存水温が 10～15℃の CASE NO.3 以外の残存率は 60%程度であるのに対し、CASE NO.3 の残存率は 48%と小さい。これは、10～15℃の保存水温がアマモ種子の発芽条件に一致しており、保存中の種子の発芽数が他の保存水温のケースよりも多かったためと考えられる。芽が少しでもみられる種子は見掛けの比重が軽くなるため、比重選別時に浮き上がることも一因である。アマモ種子を実海域などに播種するまで保存するという点で、保存中に種子が多く発芽した保存水温 10～15℃での保存は適当ではないといえる。

発芽試験終了時の状態を写真 3.4.27 に示し、試験終了時の発芽率の時間変化を図 3.4.5 に示す。CASE NO.3 の発芽率は約 20%で、他のケースの約 1/3 である。これは先述の通り、CASE NO.3 は保存期間中に既に優れた種子が発芽していたためと考えられる。CASE NO.3 以外の発芽率に大きな差はないが、保存水温が最も高い CASE NO.4 の発芽率が最も高いことに興味を惹かれる。これは自然海域の種子が形成される初夏から発芽する晩秋までの水温変化に近いものほど、保存水温条件としては良いことを示しているとも考えられた。

発芽試験終了後に発芽生長した苗を抜き取り、炉乾燥を行って乾燥質量を求めた。図 3.4.6 に 1 本あたりの乾燥質量を示す。1 本あたりの乾燥質量の軽重も発芽率と同じ序列を示し、発芽率の良いケースほど生長もよかったことが示された。

以上の結果より、アマモ種子の保存水温条件としては、より自然に近い CASE NO.4 の 15～20℃が良いといえる。しかしながら、保存水温が高いことは微生物の繁殖にも好適な条件でもあることを考慮しておく必要がある。

表 3.4.8 保存水温の影響に関する比重選別の結果(2003/10/2 計測)

CASE NO.	使用海水	塩分(psu)	水温(℃)	曝気(エアレーション)	活性炭	摘要	比重選別残存率(%)
1	江井ヶ島ろ過海水	30(未調整)	0～5	無	通常	氷温	64
2			5～10			基本条件	58
3			10～15			高温1	48
4			15～20			高温2	59



(a) 保存水温 0~5°C (b) 保存水温 5~10°C (c) 保存水温 10~15°C (d) 保存水温 15~20°C

写真 3. 4. 27 室内発芽試験終了時の発芽生育状況 (保存水温の影響)

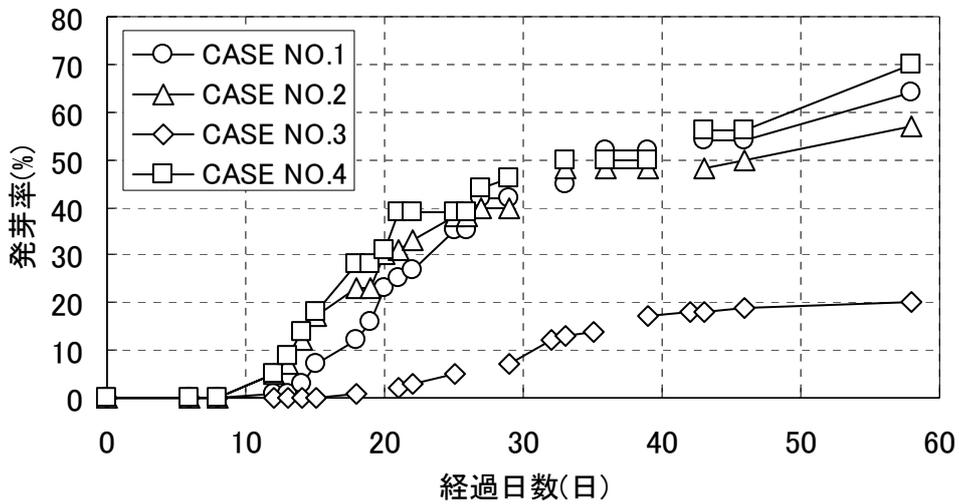


図 3. 4. 5 発芽率の変化 (保存水温の影響)

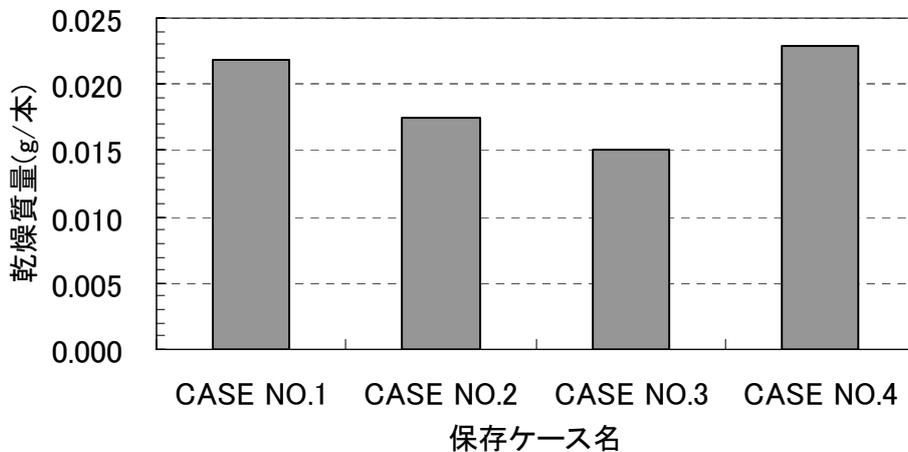


図 3. 4. 6 1本あたりの乾燥質量 (保存水温の影響)

②曝気(エアレーション)効果の検討(CASE NO.2, CASE NO.5)

曝気(エアレーション)の有無による影響を検討した CASE NO.2 と CASE NO.5 の比重選別による残存率を表 3.4.9 に示す。これより、曝気を行った CASE NO.5 の残存率は、曝気を行わなかった CASE NO.2 より小さい。これは、経過観察から曝気により好気性微生物が多く繁殖し、塊状に沈積してアマモ種子に付着したことから、種子の周辺が貧酸素状態となって種子の発芽が促進された結果、比重が軽くなったためと考えられた。保存中の発芽数も CASE NO.5 のほうが多かったことから、このように考えられた。

発芽試験終了時の状態を写真 3.4.28 に示し、試験終了時の発芽率の時間変化を図 3.4.7 に示す。曝気をした CASE NO.5 の発芽率は、曝気をしていない CASE NO.2 の半分程度であった。

発芽試験終了後に求めた 1 本あたりの乾燥質量を図 3.4.8 に示す。1 本あたりの乾燥質量も曝気をした CASE NO.5 の値は、曝気をしていない CASE NO.2 より小さい。

こうした結果から、アマモ種子の保存に曝気は必要ないと考えられた。

表 3.4.9 曝気の影響に関する比重選別の結果 (2003/10/2 計測)

CASE NO.	使用海水	塩分(psu)	水温(°C)	曝気(エアレーション)	活性炭	摘要	比重選別残存率(%)
2	江井ヶ島ろ過海水	30(未調整)	5~10	無	通常	曝気なし	58
5				有		曝気あり	48



(a) 曝気無



(b) 曝気有

写真 3.4.28 室内発芽試験終了時の発芽生育状況(曝気の影響)

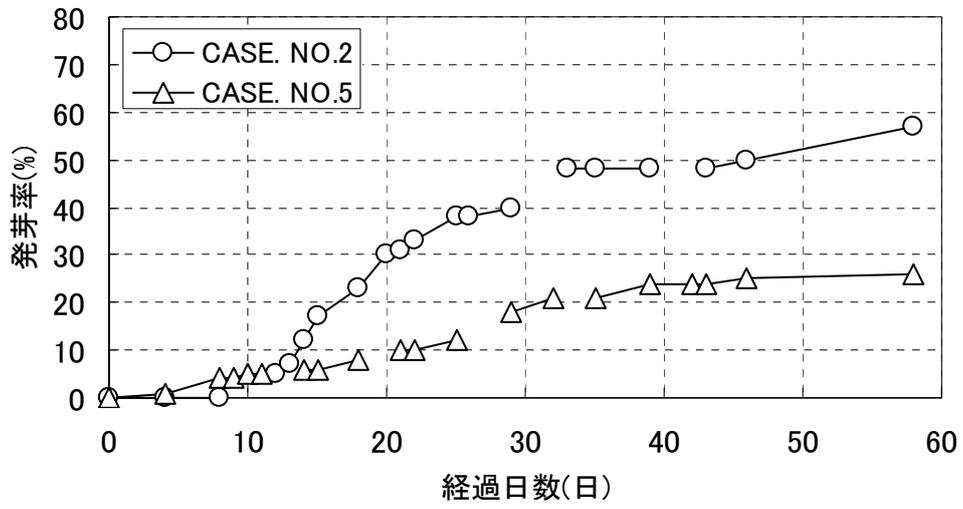


図 3. 4. 7 発芽率の変化(曝気の影響)

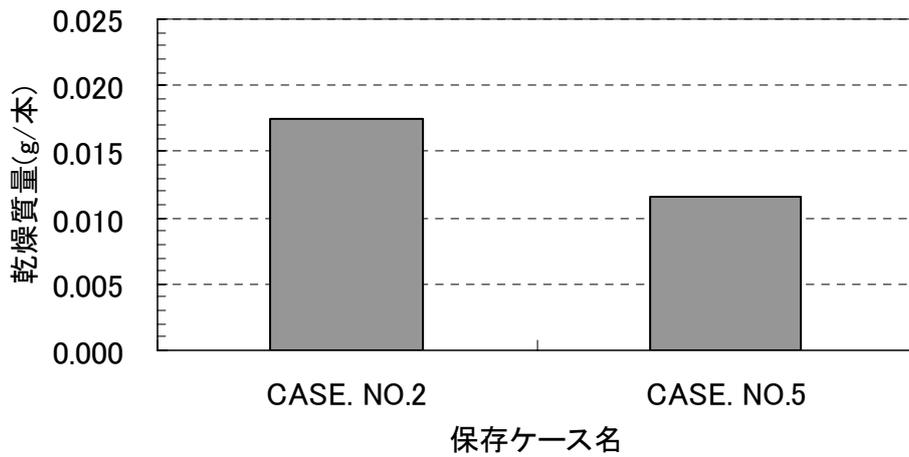


図 3. 4. 8 1本あたりの乾燥質量(曝気の影響)

③抗菌タイプ活性炭の効果(CASE NO.2, CASE NO.6)

種子保存中の海水中の好気性微生物の働きを抑制するため、水質浄化に用いられる通常のものでなく、微生物が忌避する物質を溶出する抗菌タイプの活性炭を用いた場合の有効性に関して CASE NO.2 と CASE NO.6 の比重選別による残存率を表 3.4.10 に示す。これより、水質浄化用の通常活性炭を用いた CASE NO.2 の残存率は 58%、抗菌タイプ活性炭を用いた CASE NO.6 は 55%であり、ほとんど差はない。保存後、室内発芽試験前の観察結果でも好気性微生物の発生状態にも差異はみられず、抗菌タイプ活性炭の効果は認められなかった。これは、抗菌タイプ活性炭は銀が溶出して好気性微生物の働きを抑制するものだが、0.5g/500cc の添加量では忌避物質の溶出量が少なく、効果が現れなかった可能性も考えられた。

発芽試験終了時の状態を写真 3.4.29 に示し、試験終了時の発芽率の時間変化を図 3.4.9 に示す。発芽率も抗菌タイプ活性炭を使用した CASE NO.6 と、通常活性炭を使用した CASE NO.2 とではほぼ同じであった。

発芽試験終了後に求めた 1 本あたりの乾燥質量を図 3.4.10 に示す。抗菌タイプ活性炭を使用した場合の 1 本あたりの乾燥質量は通常活性炭よりも小さい値を示した。これは CASE NO.6 の発芽試験開始が 4 日間遅れたためで、光合成量の差異と考えられた。

こうした結果から、アマモ種子の保存に抗菌タイプ活性炭の効果は、少なくとも 0.5g/500cc の添加量では認められなかった。

表 3.4.10 抗菌タイプ活性炭の効果に関する比重選別の結果(2003/10/2 計測)

CASE NO.	使用海水	塩分(psu)	水温(°C)	曝気(エアレーション)	活性炭	摘要	比重選別残存率(%)
2	江井ヶ島ろ過海水	30(未調整)	5~10	無	通常	抗菌効果なし	58
6					抗菌	抗菌効果あり	55



(a) 通常活性炭



(b) 抗菌タイプ活性炭

写真 3.4.29 室内発芽試験終了時の発芽生育状況(抗菌タイプ活性炭の効果)

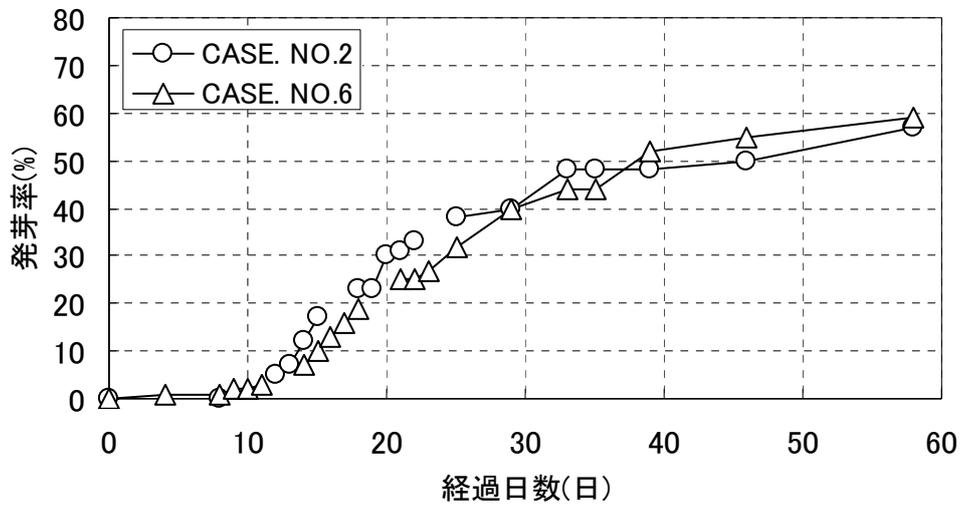


図 3.4.9 発芽率の変化(抗菌タイプ活性炭の効果)

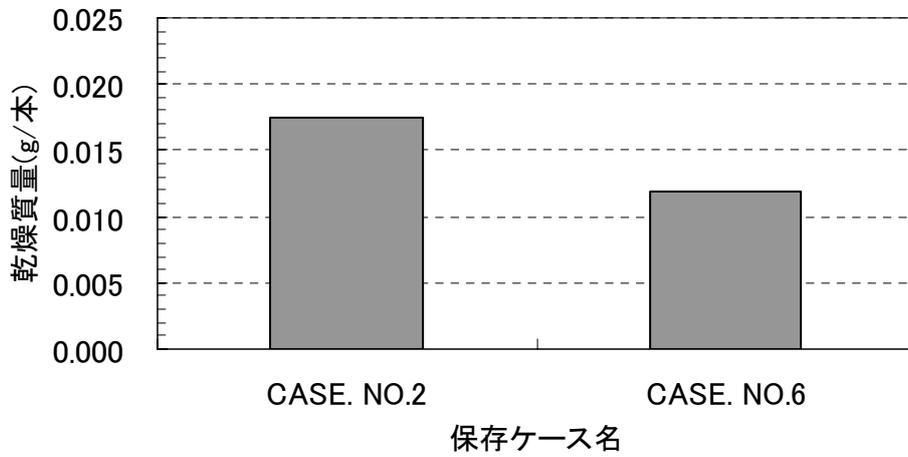


図 3.4.10 1本あたりの乾燥質量(抗菌タイプ活性炭の効果)

④塩分の影響(CASE NO.2, CASE NO.7, CASE NO.8)

微生物の働きを弱めるための高塩分時のアマモ種子の耐性確認と、低塩分時に報告されているアマモ種子の発芽促進効果(川崎ら, 1988)を確認した CASE NO.2 と CASE NO.7 および CASE NO.8 の比重選別による残存率を表 3.4.11 に示す。これより、塩分が自然海水の 30psu である CASE NO.2 が最も高い残存率を示した。低塩分 20psu の CASE NO.7 の残存率は CASE NO.2 より約 15%小さい。これは先述したように、室内発芽試験前に 40 個以上の多数のアマモ種子が発芽してしまったためと考える。アマモ種子は低塩分の状態に置かれると発芽が促進されることを、ここでも確認したこととなる。逆に塩分を 50psu と高く設定した CASE NO.8 の残存率は 51%であり、CASE NO.2 より 5%以上小さい。CASE NO.8 では保存期間中、保存容器の中で発芽したアマモ種子はみられず、高塩分が発芽を抑制したといえる。しかしながら、塩分 50psu はアマモ種子の内部保水能力に大きな負担を掛け、多くの種子が死滅し、残存率が低下したのではないかと推測された。

発芽試験終了時の状態を写真 3.4.30 に示し、試験終了時の発芽率の時間変化を図 3.4.11 に示す。発芽率は CASE NO.8, CASE NO.2, CASE NO.7 の順に小さくなり、これは塩分の高い順である。この発芽率の優劣の差は、低塩分の場合は優れた種子の多くが保存中に発芽すること、高塩分の場合は保存中に劣る種子が死滅して優秀な種子が残るためと考えられた。

発芽試験終了後に求めた 1 本あたりの乾燥質量を図 3.4.12 に示す。1 本あたりの乾燥質量はいずれも場合も大差はなく、発芽後の生長には保存塩分の影響はないものと考えられた。

こうした結果から、アマモ種子の保存において、保存水の塩分が天然海水の 30psu より小さい 20psu では、保存中に種子が発芽するために種子の保存には適さない。

表 3.4.11 塩分の影響に関する比重選別の結果(2003/10/2 計測)

CASE NO.	使用海水	塩分(psu)	水温(°C)	曝気(エアレーション)	活性炭	摘要	比重選別残存率(%)
2	江井ヶ島ろ過海水	30(未調整)	5~10	無	通常	基本条件	58
7		20				低塩分	42
8		50				高塩分	51



(a) 塩分 30psu (b) 塩分 20psu (c) 塩分 50psu

写真 3. 4. 30 室内発芽試験終了時の発芽生育状況 (塩分の影響)

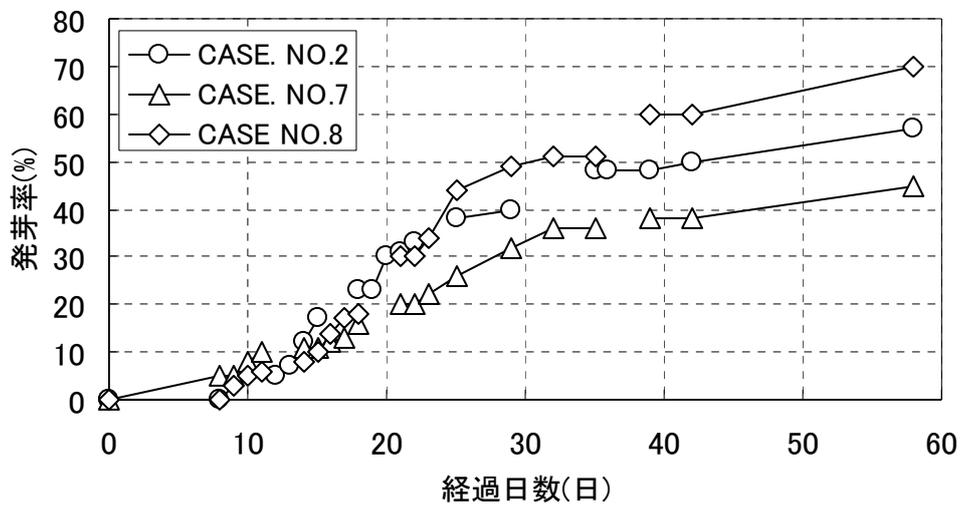


図 3. 4. 11 発芽率の変化 (塩分の影響)

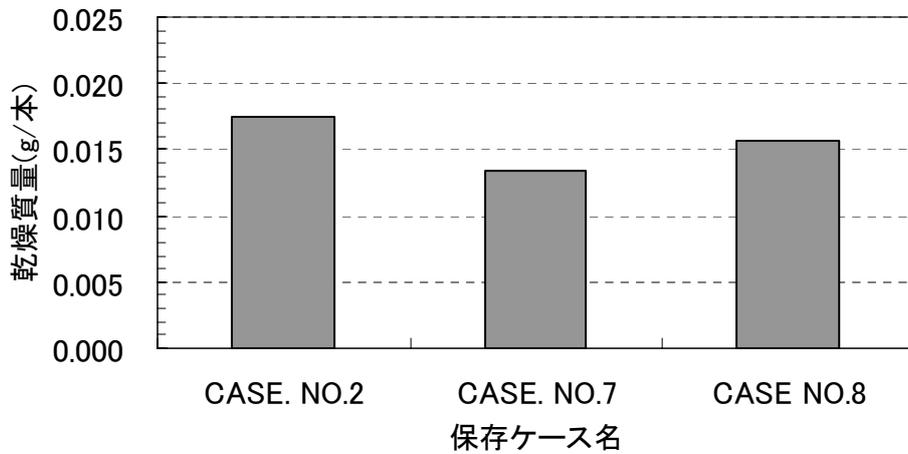


図 3. 4. 12 1本あたりの乾燥質量 (塩分の影響)

⑤保存水質の影響(CASE NO.2, CASE NO.9, CASE NO.10)

自然海水のろ過海水でなく、無菌で栄養塩類を含む人工海水や清浄で栄養塩を多量に含む海洋深層水を用いた場合を対象に、それらの有効性を検討した CASE NO.2 と CASE NO.9 および CASE NO.10 の比重選別による残存率を表 3.4.12 に示す。これより、自然海水と海洋深層水で保存した CASE NO.2 および CASE NO.10 の残存率は約 60% でほぼ同じであるが、人工海水で保存した CASE NO.9 の残存率は 41% と低い。これは、保存期間中、人工海水中では好気性微生物の繁殖が比較的抑えられていたことから、人工海水中に抗菌性物質が含まれており、これがアマモ種子に悪影響を及ぼした可能性が考えられた。

発芽試験終了時の状態を写真 3.4.31 に示し、試験終了時の発芽率の時間変化を図 3.4.13 に示す。発芽率は人工海水および海洋深層水を用いた CASE NO.9 および CASE NO.10 の場合は約 50% であり、CASE NO.2 の約 60% と比べると 10% 程度小さい。

発芽試験終了後に求めた 1 本あたりの乾燥質量を図 3.4.14 に示す。1 本あたりの乾燥質量も CASE NO.2 に比較して、CASE NO.9 および CASE NO.10 は小さい。

こうしたことから、アマモ種子の保存に無菌で栄養塩類を含む人工海水や清浄で栄養塩を多量に含む海洋深層水を使用することの好影響は認められなかった。

表 3.4.12 保存水質の影響に関する比重選別の結果 (2003/10/2 計測)

CASE NO.	使用海水	塩分(psu)	水温 (°C)	曝気 (エアレーション)	活性炭	摘要	比重選別残存率(%)
2	江井ヶ島ろ過海水	30(未調整)	5~10	無	通常	基本条件	58
9	人工海水	30				人工海水	41
10	海洋深層水	30(未調整)				海洋深層水	62



(a) 自然海水



(b) 人工海水



(c) 海洋深層水

写真 3.4.31 室内発芽試験終了時の発芽生育状況 (保存水質の影響)

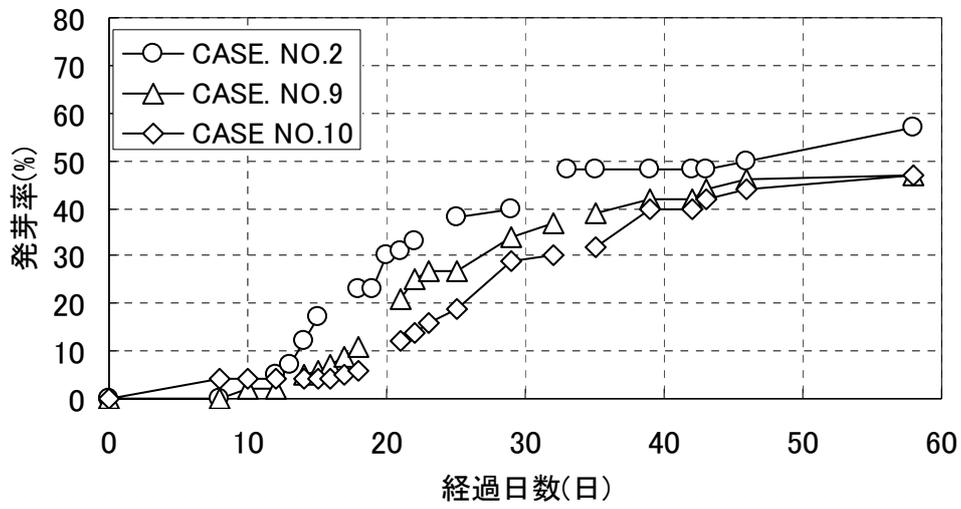


図 3. 4. 13 発芽率の変化(保存水質の影響)

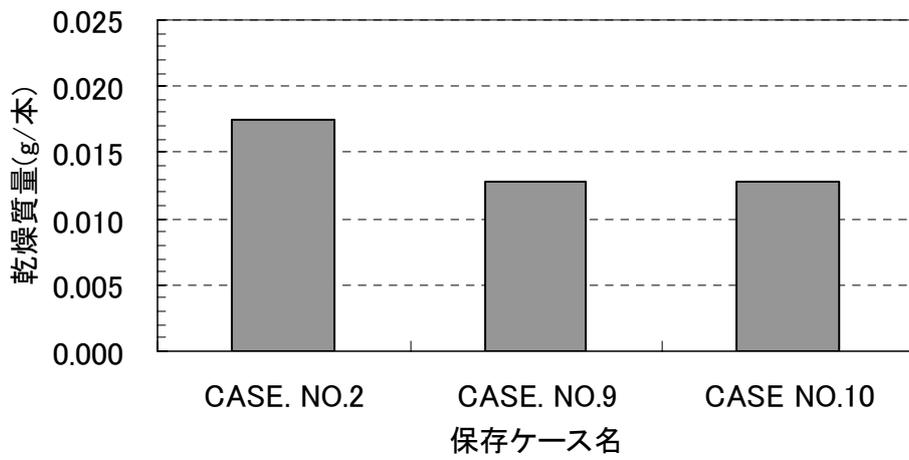


図 3. 4. 14 1本あたりの乾燥質量(保存水質の影響)

3.4.5 アマモ種子の養生・保存法のまとめ

播種シートあるいはアマモ場造成に使用する健全なアマモ種子を得るため、アマモ種子の採取、養生、保存法をそれぞれのステップで検討した。その結果を以下に示す。

- ✓ アマモ種子の採種は、大量の種子を確保することを考慮すれば、花穂だけ採取するのではなく、花枝ごと採取する方が効率的であった。
- ✓ アマモ種子を大量に養生する場合、岸壁に設置して目の前の海水を掛け流した屋外の海水流下水槽で、採取したアマモの花枝を水面に浮遊させると効率のよい養生が可能であった。
- ✓ アマモ種子の養生には、アマモ種子を十分追熟させることが重要である。
- ✓ 比較的小規模のアマモ種子の養生であれば、室内での小型水槽を用いて、海水を循環させることで可能である。この場合、人工海水の使用も可能である。
- ✓ 検討した範囲では、アマモ種子の発芽率からみたアマモ種子の健全性は、室内養生より屋外養生が優れていた。屋外養生では種子の追熟時に日光の直射を受けたこと、常に新鮮な海水を掛け流したことによると考えられた。
- ✓ 養生後のアマモ種子の保存については、天然の海水をろ過したものを使用して、自然界でアマモ種子が成熟し発芽を待つまでの水温に近い15～20℃で保存するのが最も適していたが、水温が高くと保存中のアマモ種子への悪影響が懸念される微生物の活動にも好適となることから注意が必要とされた。この対策として、アマモの発芽条件より低い10℃以下での保存がアマモ種子の健全性をさほど失わずに済み有効である。

3.5 播種シートによる大規模アマモ場造成試験

3.5.1 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 3.5.1** および**写真 3.5.1** に示す兵庫県明石市の東播海岸・谷八木地区前面海域において 2001 年 11 月から実施した。現地は 2 基の突堤に挟まれたポケットビーチの形状をしており、東側の突堤の先には消波ブロック積みの離岸堤が設置されている。また、当該海域の約 500m 東側には 2 級河川の谷八木川が流入している。事前調査の結果、海底勾配は水深-1.5m 以浅が約 1/7、それ以深は約 1/50 であった。また、底質は礫混じりの砂で、水深-3m 付近の底質の中央粒径は 0.3mm 程度であった。

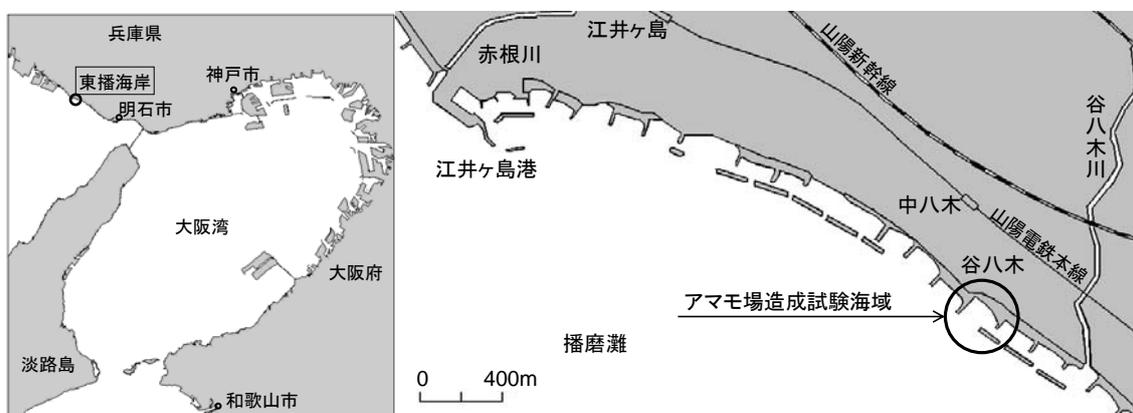


図 3.5.1 アマモ場造成試験海域位置図



写真 3.5.1 アマモ場造成試験海域空中写真

宇多(1997)は当該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(図3.5.2)。また、汀線変化にともなって、水深-1.5m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(図3.5.3)。この等深線の移動について、宇多(1997)は離岸堤と西突堤の間を南西方向から進入した入射波に対して、養浜後の初期汀線が斜めに傾いていたため、汀線の方が卓越波の入射方向とほぼ直角になるように東向きに沿岸漂砂が生じたことによって引き起こされたものとし、さらに、等深線の著しい変動が-1.5~2mの間で生じていることから、波による地形変化の限界水深がほぼ1.5mにあると指摘している。

今回の実海域試験に先立ち2001年9月5日に実施した深浅測量時において、当該海岸の汀線形状は、西突堤側は汀線が突堤基部近くに、東突堤側の汀線は突堤先端近くにあつて図3.5.2に示された安定した汀線形状とほぼ同一であった。図3.5.4に、西突堤から東側に90m離れた位置に設けた測線における深浅測量の結果を示す。汀線から沖に10m程度で水深が1.5m程度となり、その沖側は緩やかに深くなっているが、こうした傾向は宇多(1997)が示した海浜縦断形(図3.5.5)とよく似ている。こうしたことから、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。

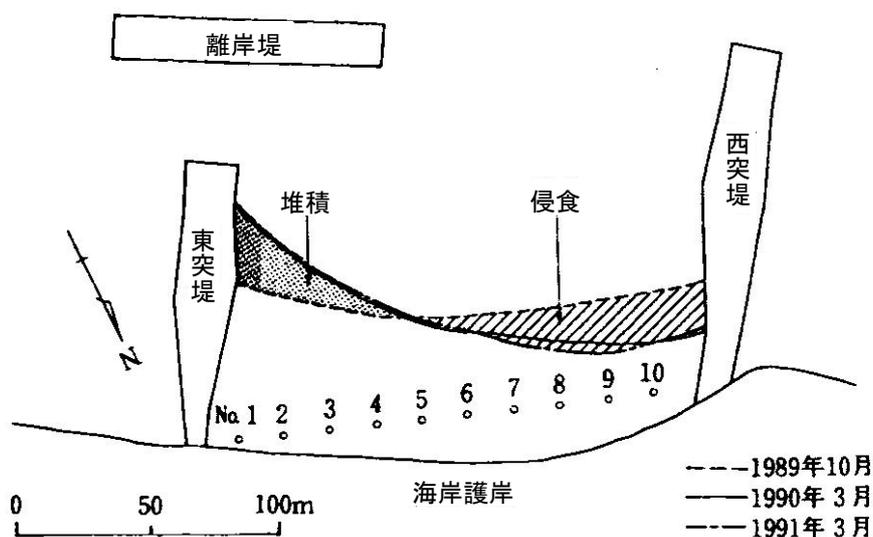
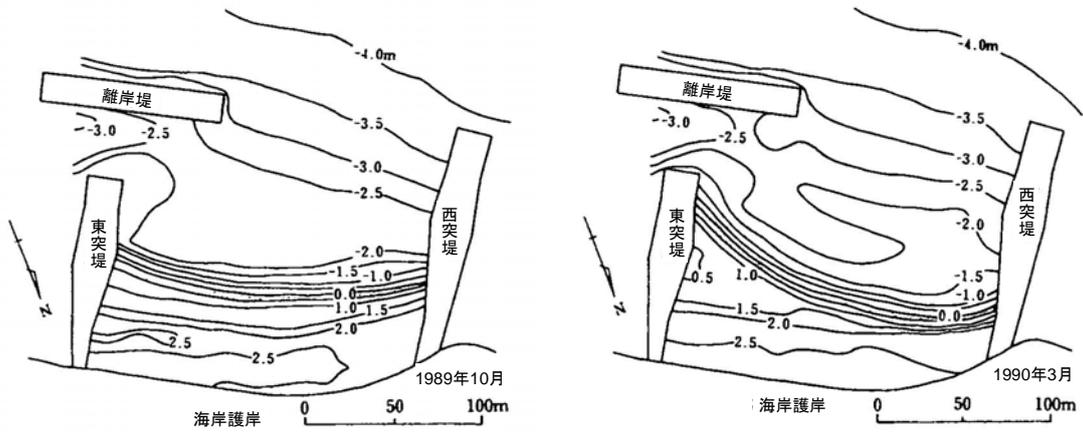


図3.5.2 谷八木地区の汀線変化(宇多, 1997)



(a) 1989年10月

(b) 1990年3月

図 3.5.3 谷八木地区の深浅図(宇多, 1997)

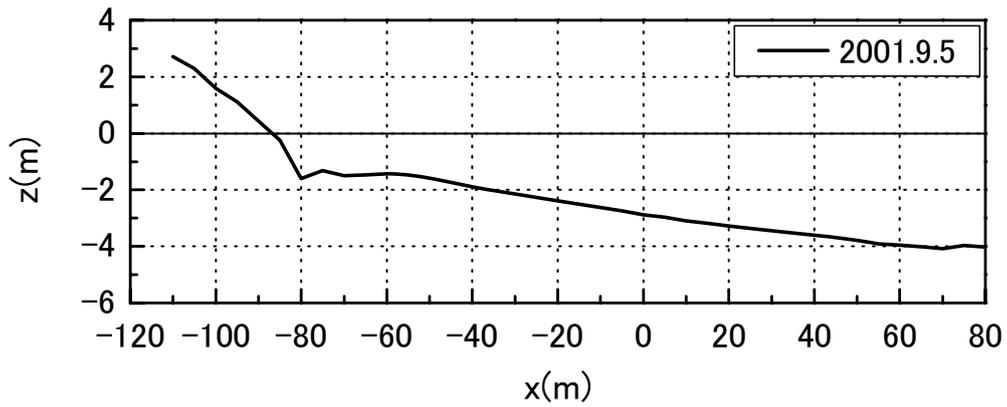


図 3.5.4 深浅測量結果(2001年9月, 西突堤より東側90mの測線)

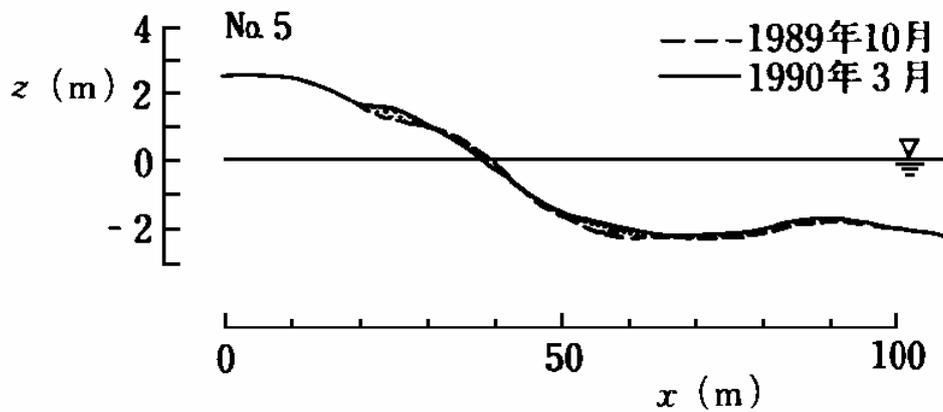


図 3.5.5 海浜縦断形(宇多, 1997; 図 3.4.2 中 No. 5 の測線)

3.5.2 播種シートの配置

事前調査の段階で、現地海域の離岸堤の背後、東側の突堤との間の水域には自生のアマモ群落が存在していたが、離岸堤と西側の突堤の間の開口部にはアマモはごく僅かに点在するのみであった。したがって、当該海域では、離岸堤の背後では波が遮蔽されてアマモが継続的に存在しうる環境であるが、水深がほぼ同じ離岸堤と西側の突堤の開口部では波当たりが強く、アマモが定着するにはやや厳しい条件の場所であると考えられた。播種シート工法は、生分解性不織布とヤシマットによって強制的にアマモ種子を海底に固定するため、従来の播種法ではアマモ場造成が困難な波当たりがやや強い場所でもアマモ場造成が可能なが期待された。そこで、本アマモ場造成試験では、アマモ場造成における波浪に関する制約条件を緩和することを狙って、やや波当たりの強い場所に播種シートを設置することとした。

一方、本アマモ場造成試験の目的のひとつに、芳田ら(1998)の構想にあった播種シートを鋼製等の芯材に巻きつけてロール状にしたもの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、敷設するといった施工法の確認があった。そこで、播種シートの大きさは施工ヤードや作業船の規模等を勘案して10m×30mとした。

これらの理由により、本アマモ場造成試験では図 3.5.6 に示すように、離岸堤と突堤の開口部の水深が-2.5~-3.0m の地点に10m×30m(300m²)の播種シート2枚をシートの長手方向が汀線とほぼ平行となるように敷設した。また、波浪等外力の影響を検討するため、離岸堤端部背後に5m×5m(25m²)の播種シート1枚を敷設した。なお、離岸堤と西側の突堤の開口部の播種シート敷設場所にはアマモは自生していなかった。また、離岸堤背後の播種シート敷設場所は自生のアマモ群落の脇で、アマモは自生していなかった。

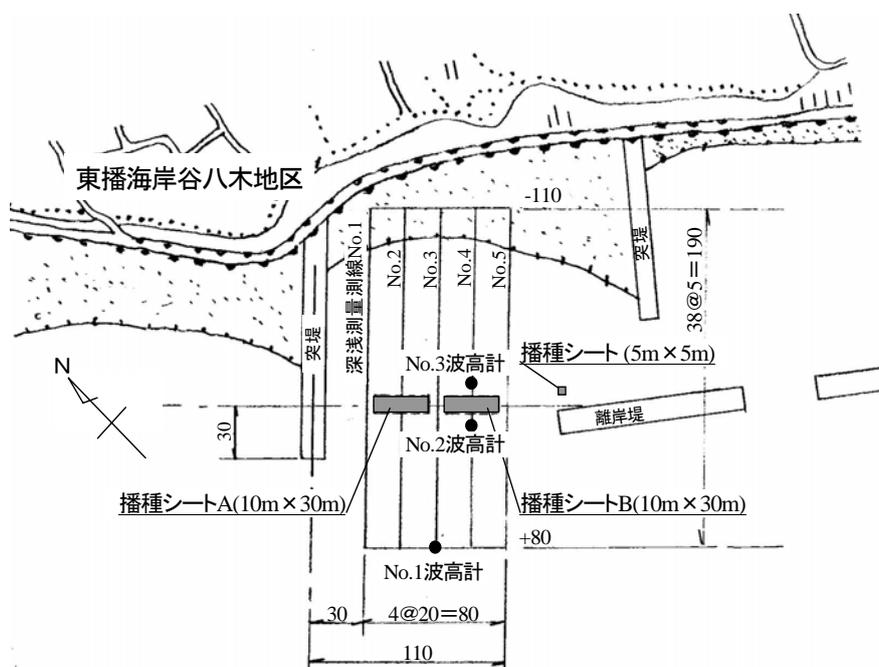


図 3.5.6 播種シートの敷設位置

3.5.3 播種シートの製作

この実海域試験で使用した播種シートの構成は、芳田ら(1999)が示した上部に生分解性不織布、下部にヤシ繊維からなるヤシマットという基本構造を踏襲し、さらに播種シートを海底に設置した後のシートの舞い上がり防止用と陸上でのシート製作で最終的にシートをロール状に巻き取る際の引張りに対する補強部材として菱形金網(線径3.2mm, 網目75mm)を生分解性不織布の上に被せたものとした(図3.5.7)。ここでは、生分解性不織布に20g/m²のレーヨン、ヤシマットは厚さ3mmのものを使用した。

また、アマモ種子は同じ2001年の6月に赤穂市海浜公園および姫路市白浜海岸の前面海域にあるアマモ場において採取したものをを使用した。播種シート製作から海底に敷設するまでの間、アマモ種子が乾燥するのを防ぐため、アマモ種子は増粘剤や乳化安定剤としての食品添加物でもあるCMC(カルボキシメチルセルロース)の5%水溶液に混ぜて扱った(写真3.5.2)。CMC水溶液とアマモ種子の割合は、アマモ種子300粒に対してCMC5%水溶液2Lとした。

播種シートの製作方法は、作業ヤードに菱形金網を敷き(写真3.5.3)、その上に生分解性不織布を重ね、CMC水溶液に混ぜたアマモ種子が1m²当たり300粒となるよう、ローラー刷毛で生分解性不織布上に一様に塗布した(写真3.5.4)。次に、ヤシマットを重ね(写真3.5.5)、ヤシマットの上から生分解性不織布および菱形金網の3枚のシートをCリングで結合して一体化し(写真3.5.6)、播種シートを完成させた。そして、この播種シートをロール状に巻き取るに当たり、菱形金網を下にして製作した10m×30mの播種シートを、ヤシマットを下にして敷設するために一度裏返した。その後、巻取り機にて長さ10m余りの芯材の鋼管(SGP 250A)に巻き取り(写真3.5.7)、直径0.8m、長さ10mのロール状にした(写真3.5.8)。5m×5mの播種シートも同様にして製作した。

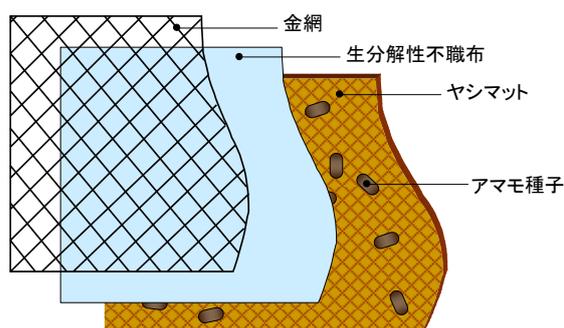


図 3.5.7 播種シートの構成



写真 3.5.2 アマモ種子と CMC5%水溶液



写真 3.5.3 菱形金網の展張



写真 3.5.4 アマモ種子の塗布



写真 3.5.5 ヤシマットの展張



写真 3.5.6 シートの結合



写真 3.5.7 播種シートの巻取り



写真 3.5.8 播種シートの完成

3.5.4 播種シートの敷設

播種シートの試験海域への敷設に当たっては、試験海域の沖合いで海苔養殖を行っていた江井ヶ島漁業協同組合の協力を得て実施した。なお、播種シートの敷設時期が海苔養殖の実施時期と重なったため、**図 3.3.1** に示した起重機船のような大型の作業船の試験海域への入域が認められず、代替として小型の潜水士船を使用することとした。

鋼管に巻き取った播種シートは、乾燥防止のためブルーシートで覆って養生した後、翌日の2001年11月15日に現地敷設のために試験海域の3kmほど西に位置する江井ヶ島港(**図 3.5.1**)へ輸送し、そこでトラッククレーンで岸壁から漁船に積み込んで試験海域まで運搬した。試験海域では2隻の潜水士船で**写真 3.5.9**のように播種シートを相吊りした。そして、播種シートを相吊りした状態で、播種シートを所定の敷設位置に沈めて潜水士が播種シート端部を海底に固定し(**写真 3.5.10**)、2隻の潜水士船を後退させながら播種シートを海底に展張・設置した(**写真 3.5.11**)。

初めての大型播種シートの敷設ということで念入りに位置確定等をしたこともあり、1枚当たりの敷設には1時間程度を費やしたが、播種シートの展張自体はスムーズに行われた。これにより、将来的には25m×100mのシートを1時間程度で敷設、1日4枚で合計1haの藻場造成を行う構想についても十分に可能性があり、本工法の特徴である「大量・急速施工により大規模なアマモ場造成が可能」という点について確認できた。

また、潜水作業を極力少なくすることができるので、従来工法に比べてかなりのコストダウンが可能であるとの見通しも得ることができた。



写真 3.5.9 播種シートの敷設作業状況



写真 3.5.10 播種シート始端部の固定状況



写真 3.5.11 敷設後の播種シート

3.6 播種シートによるアマモの発芽・生育および藻場の永続性

3.6.1 アマモの発芽・生育数の変化

播種シートを設置して約1ヵ月後の2001年12月から約1年6ヵ月後の2003年5月までは2ヶ月あるいは3ヶ月毎に潜水士による追跡調査を実施し、その後は1年に1回の追跡調査を実施している。潜水士による調査内容は主としてアマモの発芽・生育数で、アマモ場として安定してきたときからは、周辺の自生アマモ場の生育密度と葉長も計測した。計測結果を表3.6.1に示す。

表 3.6.1 アマモの発芽・生育数の変化

播種シート敷設位置		離岸堤と突堤の開口部		離岸堤背後			離岸堤背後自生アマモ	
		西側(A)	東側(B)	25m ² (5m×5m)				
敷設面積		300m ² (10m×30m)		25m ² (5m×5m)				
調査年月日	経過年月	生育本数 (本)	生育本数 (本)	生育本数 (本)	生育密度 (本/m ²)	平均葉長 (cm)	生育密度 (本/m ²)	平均葉長 (cm)
2001/12/19	1ヶ月	0	0	0	0			
2002/2/21	3ヶ月	55	115	173	7			
2002/4/5	5ヶ月	31	32	179	7			
2002/6/25	7ヶ月	68	75	860	34	42.5		
2002/8/20	9ヶ月	70	43	750	30			
2002/11/29	12ヶ月	20	5	417	17			
2003/2/26	1年3ヶ月	43	8	917	37			
2003/5/20	1年6ヶ月	63	0	1,273	51	80.0		
2004/5/26	2年6ヶ月	76	6	3,225	129	70.0		
2005/5/17	3年6ヶ月	実施せず		3,050	122	67.0	165	120.0
2006/5/24	4年6ヶ月			4,063	163	65.0	237	65.0
2007/5/30	5年6ヶ月			4,733	189	60.0	148	73.3
2008/5/27	6年6ヶ月			4,583	183	61.7	205	61.3
2009/6/5	7年7ヶ月			3,333	133	65.0	150	85.0
2010/6/11	8年7ヶ月			3,250	130	90.0	132	90.0
2011/6/7	9年7ヶ月			3,450	138	85.0	178	90.0

播種シートを設置して約1ヵ月後の2001年12月19日に実施した潜水士による追跡調査ではアマモの発芽は確認されなかった。その時の播種シートの状態は設置当初と変わらず安定しているところが大部分を占め、シートの端部付近では、所々金網が浮いた場所が認められた。シートの表面には砂が被っていたため生分解性不織布の状態は判別が困難であったが、シート表面はヤシマットの繊維と思われる毛羽立ちが多く見られたことから、生分解性シートの多くは分解・消失したものと考えられた(写真3.6.1)。

播種シートを設置して約3ヶ月後の2002年2月21日の追跡調査では葉長が10~20cmに発芽・生育したアマモが確認された。発芽数の調査方法は、10m×30mのシートでは幅0.5m×長さ30mの測線4本を設定し、5m×5mのシートでは幅0.5m×長さ5mの測線3本でその中の発芽数を計測した。この測線計測方法は2003年5月まで、2002年4月を除いて同一である。2002年4月はシート全面積の発芽・生育数全数調査を実施した。

播種シートを設置して約1年6ヵ月後の2003年5月までのアマモの発芽・生育数について表3.6.1によれば、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、1m²当たり30本の生育密度に達した。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1年3ヵ月後の2003年2月の株数は917本に増大した。この時のアマモ株は写真3.6.2に示すように小さなパッチ状の群落として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た。さらに3ヵ月経過した2003年5月における株数は1273本に増大し、種子をつけた花枝が多数観察された(写真3.6.3)。このように種子の再生産が確認されたことにより、この造成したアマモ場が永続的に存続する可能性が示された。

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、離岸堤背面の播種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、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実性が低いことを示している。この突堤と離岸堤の開口部に敷設した播種シートでのアマモの発芽・生育数は翌年の2004年5月の調査でも大きな変化は見られず、この回で調査を打ち切った。



写真3.6.1 敷設1ヵ月後の播種シート 写真3.6.2 パッチ状のアマモ場(2003年2月)



写真3.6.3 造成アマモ場の花枝(2003年5月)

2004年5月以降の、離岸堤端部背面に敷設した播種シート(5m×5m)の発芽・生育数調査では、シート内に設定した3本の測線上にコドラート(32cm×32cm)を複数個置き、その中のアマモ本数を計測した。また、播種シート周辺のアマモの自生範囲も調査した。図3.6.1は2004年5月調査時の播種シート周辺の模式図である。播種シート内にアマモが繁茂していたほか、この播種シート北西側と南東側に、この造成したアマモ場から広がったと期待されるようなアマモが存在していた。なお、これらのアマモ場ではメバルの稚魚、アサヒアナハゼ等数種類の魚介類が観察された。

図3.6.2は2005年5月調査時の播種シート周辺の模式図である。この年には前年に見られた播種シート範囲外のアマモがその生育範囲を大きく広げていた。特に播種シート北西側に見られたアマモ場は播種シートの北側(陸側)を東方に広がっていた。

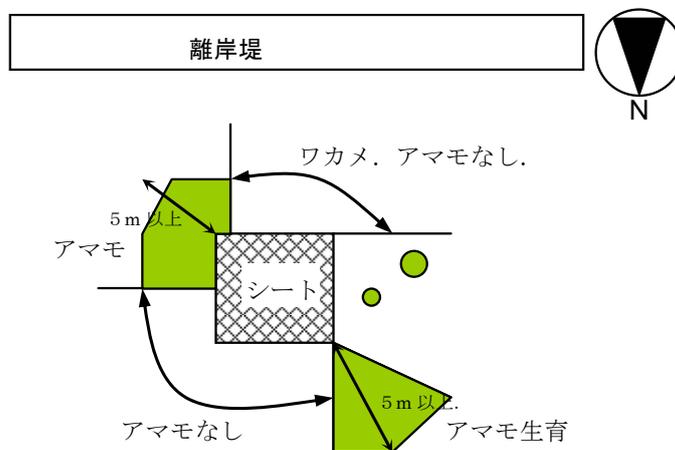


図 3.6.1 播種シート周辺のアマモ場(2004年5月)

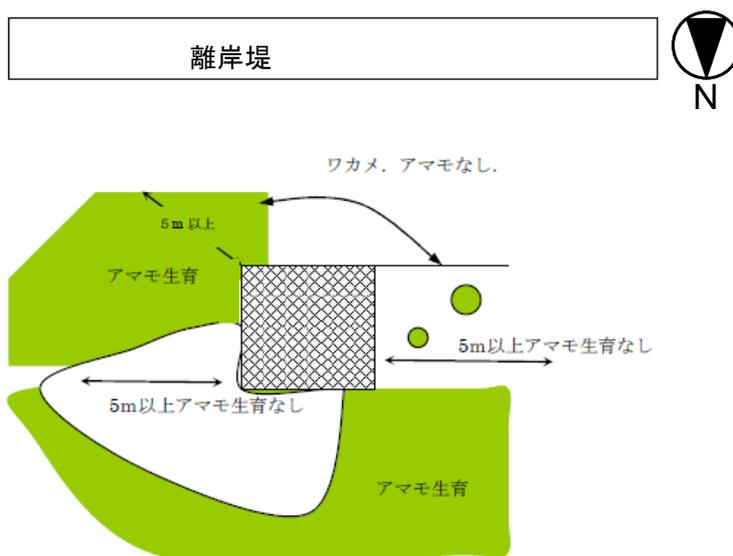


図 3.6.2 播種シート周辺のアマモ場(2005年5月)

図 3.6.3 は 2006 年 5 月調査時の播種シート周辺の模式図である。この年の調査では、播種シート範囲内のアマモは周辺の自生アマモ場とははっきりと分かれて生育しており、地下茎による播種シート外への伸長はほとんど観察されなかった。播種シート外のアマモ場は播種シート内のアマモ場より密生していた。なお、アマモ周辺ではメバル幼魚、カレイ稚魚、キュウセン、アイナメ等の魚類が観察され、アマモ群落内にはイカの卵が確認された。

図 3.6.4 は 2007 年 5 月調査時の播種シート周辺の模式図である。この年の調査では、播種シート範囲内はアマモの生育が見られない東端部を除き、アマモは一様に密生していた。また、その生育範囲は播種シートの北側や西側で播種シート外へも伸長していた。

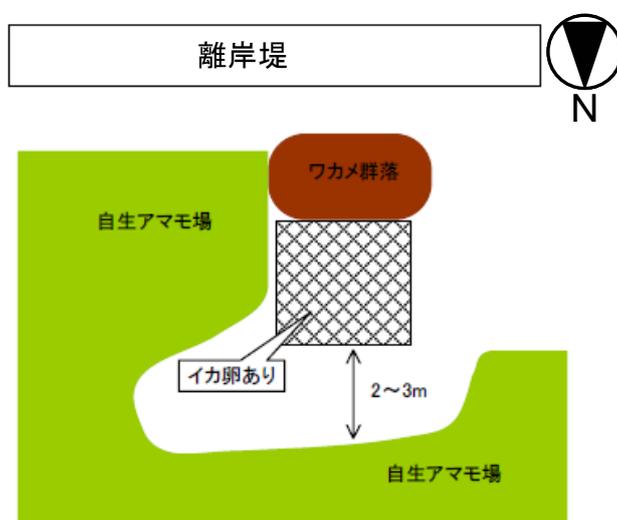


図 3.6.3 播種シート周辺のアマモ場(2006年5月)

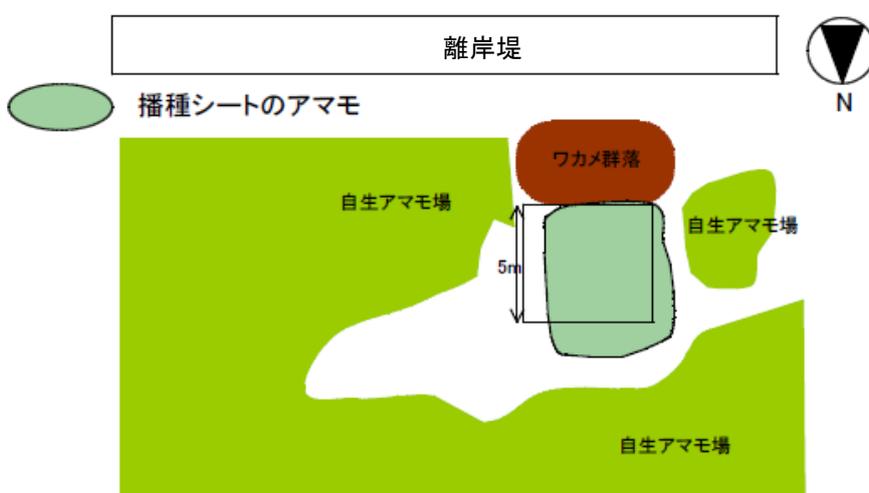


図 3.6.4 播種シート周辺のアマモ場(2007年5月)

図 3.6.5 は 2008 年 5 月調査時の播種シート周辺の模式図である。この年の調査では、播種シート内のアマモはパッチ状に生育していない部分もあったが、それ以外は一様に密生していた。また、この年もシートの北側や西側で地下茎による播種シート外への生育範囲の拡大が確認され、自生アマモ場との境界が不明瞭となっていた。なお、播種シート自体は底質に埋もれてほぼ見えなかったが、腐食した菱形金網や黒く変色したヤシマットが底質中で確認できた。

図 3.6.6 は 2009 年 6 月調査時の播種シート周辺の模式図である。この年の調査では、播種シート内のアマモが生育していない部分が前年より広がったように観察された。一方、播種シート西側を中心に地下茎による播種シート外への生育範囲の拡大がみられ、自生アマモ場との境界はなくなっていた。しかしながら、前年まで播種シート北側に拡大していたアマモ群落は比較的広範囲に消失していた。この部分では一時的な底質の移動によりアマモ株が地下茎ごと流された可能性が考えられた。



図 3.6.5 播種シート周辺のアマモ場(2008年5月)

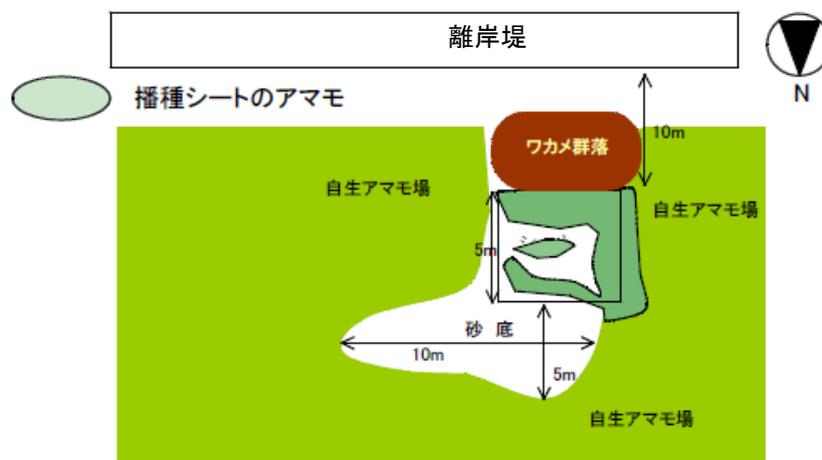


図 3.6.6 播種シート周辺のアマモ場(2009年6月)

図 3.6.7 は 2010 年 6 月調査時の播種シート周辺の模式図である。この年のアマモ場の分布範囲は播種シート内外ともに前年とよく似ていた。播種シート内のアマモは、播種シート西側および北側の一部で自生アマモ場と一体となった群落を形成しており、どこまでが地下茎によって播種シート外への生育範囲を拡大したものか判別は困難であった。

図 3.6.8 は 2011 年 6 月調査時の播種シート周辺の模式図である。この年のアマモ場の分布範囲も前年とよく似ていて、播種シート内にアマモが生育しない範囲がパッチ状に存在するものの、播種シート内のアマモは周辺の自生アマモ場と一体となった群落を形成していた。

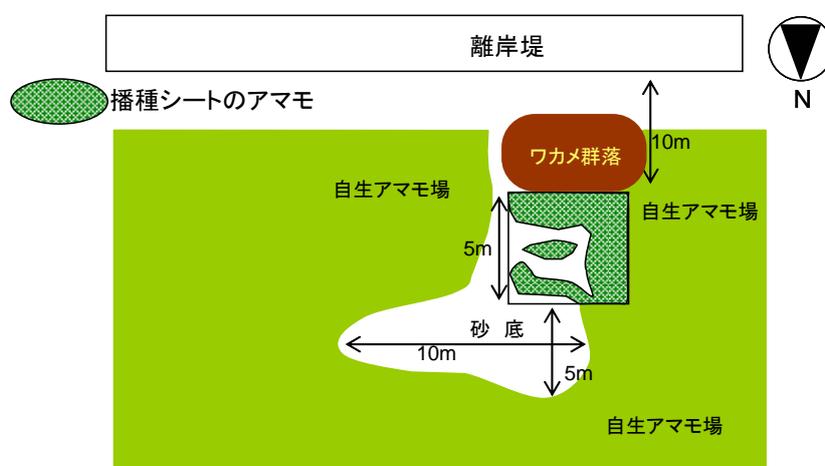


図 3.6.7 播種シート周辺のアマモ場(2010年6月)

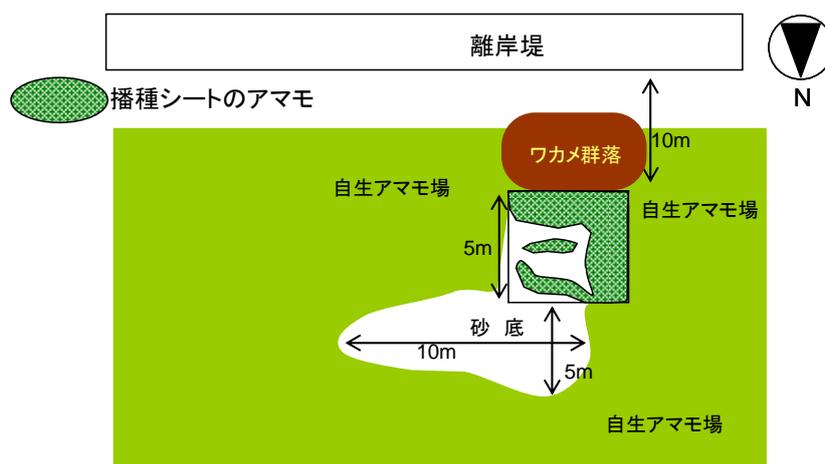


図 3.6.8 播種シート周辺のアマモ場(2011年6月)

このように、播種シートから発芽・生育し、群落を形成したアマモは、播種シート外にも地下茎を伸長して群落を拡大させたことが確認できた。こうしたことから、播種シートにより核となるアマモ群落を造成し、それらが周辺に広がることで大きなアマモ場が形成されることが期待された。その一方で、一度はアマモが繁茂したエリアでアマモが消失することも確認されたことから、造成後の管理の必要性が示唆された。また、もともとアマモが自生していない場所に播種シートを敷設したものであるが、播種シート敷設後には播種シートを取り囲むように自生のアマモ場が広がった。この自生アマモ場の拡大と播種シート敷設との因果関係は明らかではないが、播種シートから育ったアマモあるいは播種シートそのものが周辺の環境に影響して、自生アマモの生育範囲が拡大した可能性も考えられた。

この $5\text{m} \times 5\text{m}$ の播種シートと周辺の自生アマモ場に対する調査結果から、生育密度の変化を図 3.6.9 に示す。自生アマモ場の生育密度の変動がやや大きいものの、2008 年 5 月以降、両者はほぼ同一の値を示しており、造成したアマモ場が 6 年 6 ヶ月を経て天然のアマモ場と同等に成熟したものとみなすことが出来る。また、同様にアマモの平均葉長を比較したものを図 3.6.10 に示す。平均葉長においても、2005 年 5 月以降、造成したアマモ場のアマモ個体は天然のアマモと同等の規模であることがわかる。

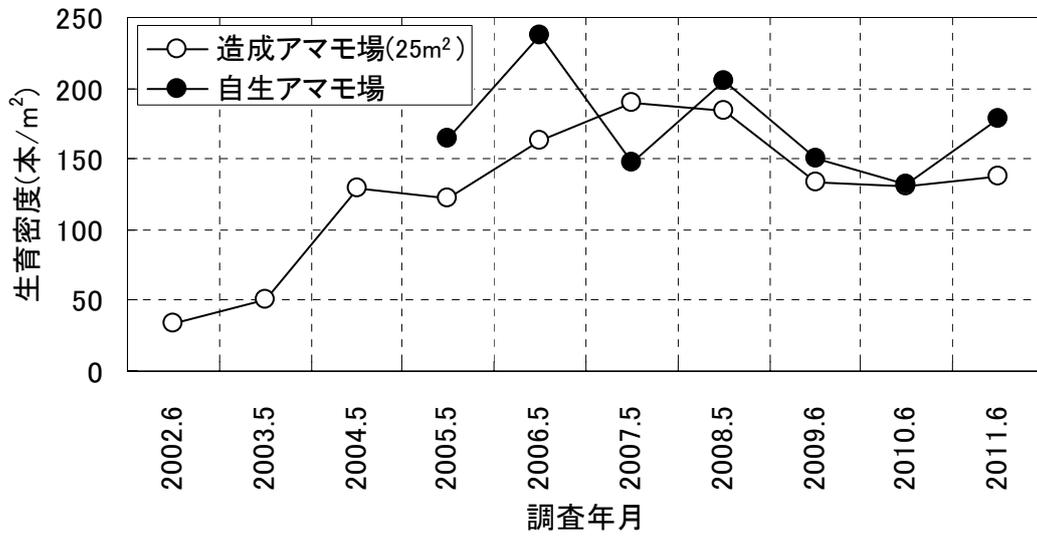


図 3.6.9 造成アマモ場と自生アマモ場の生育密度の変化

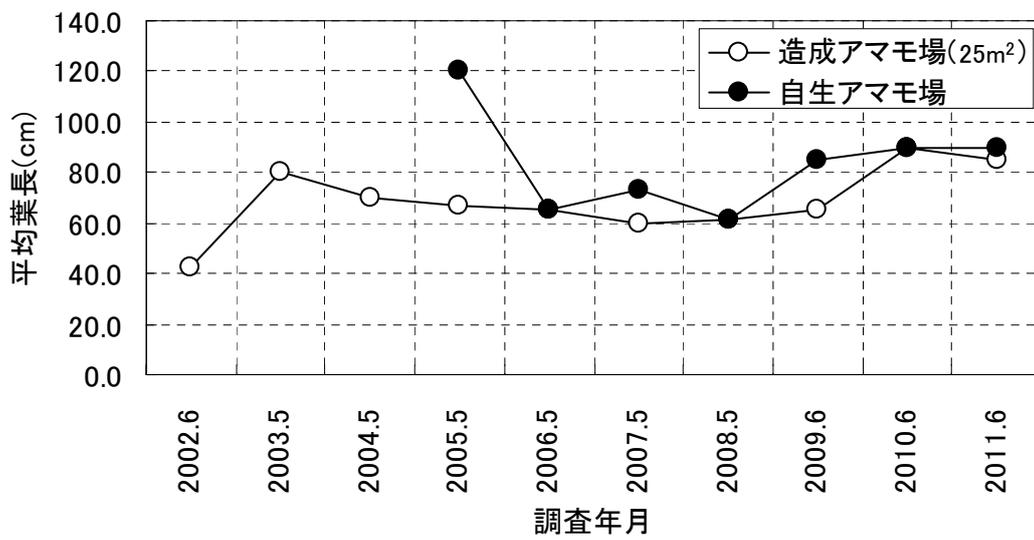


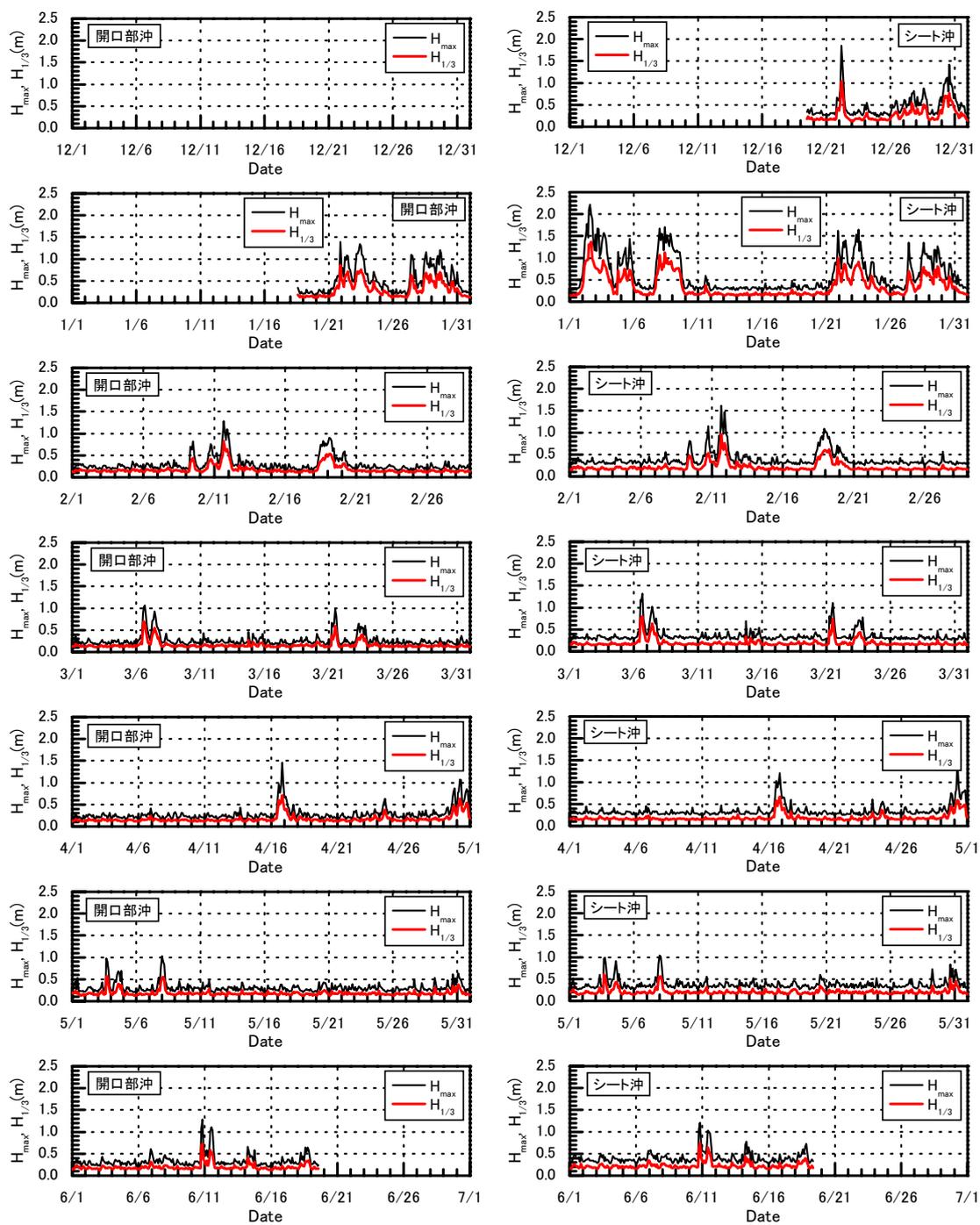
図 3.6.10 造成アマモ場と自生アマモ場の平均葉長の変化

3.6.2 造成初期における来襲波浪の影響

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 3.5.6**に示す位置に海底設置型超音波式波高計3台を設置し、来襲波浪を計測した。突堤と離岸堤の開口部の沖、水深約5.5mの位置に設置したNo.1波高計および東側の10m×30mの播種シート沖側の水深約3.5mの位置に設置したNo.2波高計はアイオーテック社製のWaveHunter、No.2波高計と播種シートを挟んだ岸側に設置したNo.3波高計は協和商工社製のWaveObserverである。波浪観測は全て2時間毎の正時を挟む20分間に0.5秒刻みで計測した。なお、播種シート沖側に設置したNo.3波高計は、生長したアマモによる波高低減効果を検討することを狙って設置したものであったが、**表 3.6.1**に示したように、この開口部位置でのアマモの発芽生育が思わしくなかったことから、2002年3月はじめに計測を打ち切った。ここでもNo.3波高計の計測結果は割愛する。

図 3.6.11 および **図 3.6.12** に開口部沖側に設置したNo.1波高計と播種シート沖側に設置したNo.2波高計の最大波高 H_{\max} と有義波高 $H_{1/3}$ および最大波周期 T_{\max} と有義波周期 $T_{1/3}$ の観測結果を示す。なお、開口部沖側に設置したNo.1波高計はNo.2波高計より約1ヶ月遅れて計測を開始した。**図 3.6.11**によれば、2001年12月および2002年1月には、有義波高 $H_{1/3}$ で1m程度、最大波高 H_{\max} で1.5mを超える高波浪が数日間継続して断続的に来襲していた。2002年1月10日から20日にかけては有義波高 $H_{1/3}$ が0.2m程度の静穏な状態が続いた。2002年2月以降も月に数回ほど有義波高 $H_{1/3}$ が0.5mを超える高波浪が1日程度継続して来襲しているが、それ以外の期間は有義波高 $H_{1/3}$ が0.2m程度の静穏であった。この期間、冬から夏に季節が移るに従い、高波浪の継続時間が短く、波高も小さくなる傾向が認められた。なお、開口部沖のNo.1波高計および播種シート前のNo.2波高計の計測結果を比較すると、多少の浅水変形あるいは碎波によると考えられる差異は見られるが、大きな差ではない。

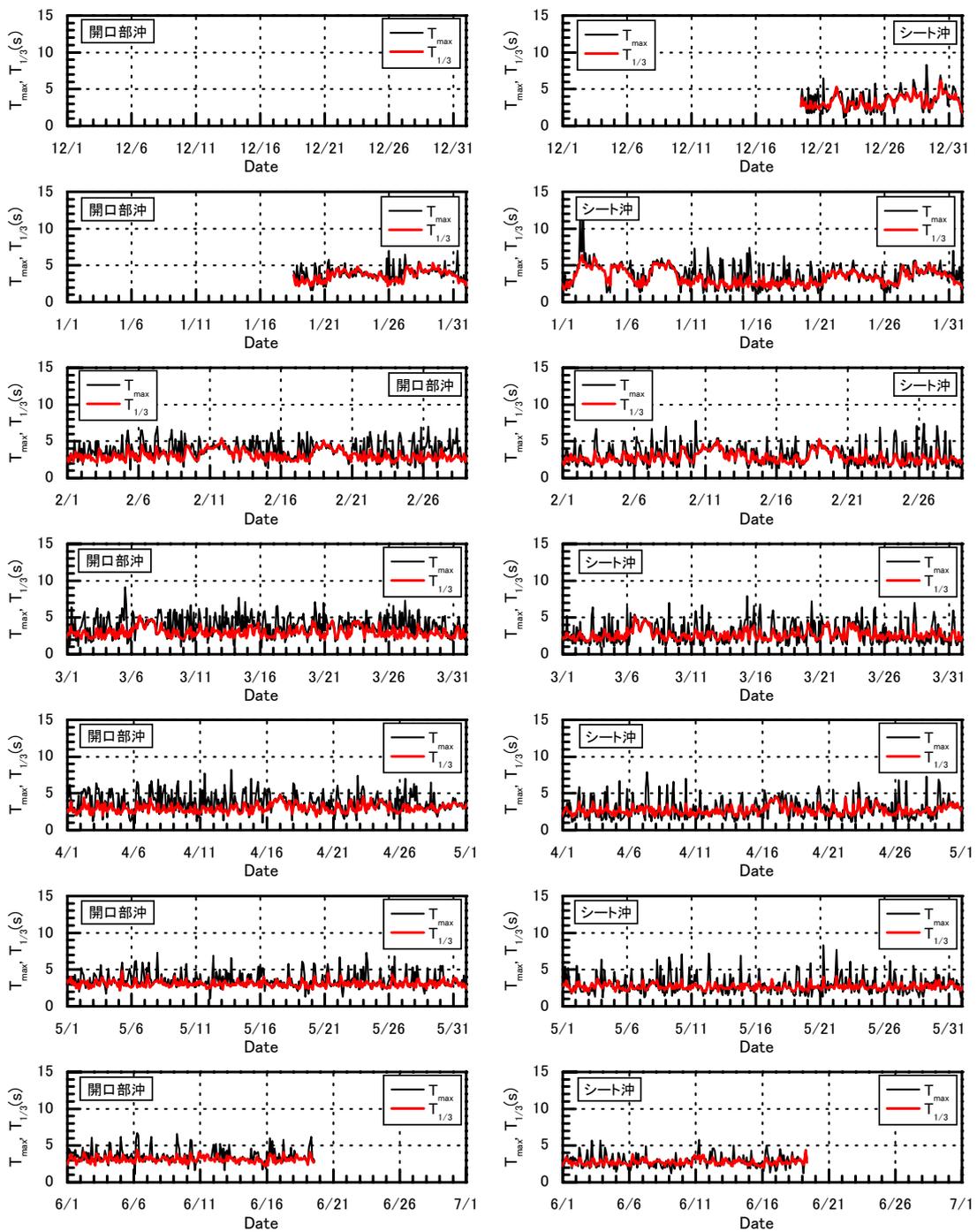
最大波周期 T_{\max} と有義波周期 $T_{1/3}$ について示した**図 3.6.12**によれば、2001年12月および2002年1月の高波浪時の有義波周期 $T_{1/3}$ は5秒程度、2002年1月10日から20日にかけての静穏時の有義波周期 $T_{1/3}$ は3秒程度であった。2002年2月以降も高波浪時には有義波周期 $T_{1/3}$ が5秒程度に達するが、静穏時の有義波周期 $T_{1/3}$ は3秒程度であった。5月にはいると、高波浪時でも有義波周期 $T_{1/3}$ は4秒程度で静穏時との差が小さくなった。



(a) 開口部沖

(b) 播種シート沖

図 3.6.11 波浪観測結果(最大波高と有義波高; 2001 年 12 月~2002 年 6 月)



(a) 開口部沖

(b) 播種シート沖

図 3. 6. 12 波浪観測結果(最大波周期と有義波周期 ; 2001 年 12 月 ~ 2002 年 6 月)

播種シートの沖側で計測した No.2 波高計の結果を用いて、計測期間中の月別の最大有義波諸元を表 3.6.2 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 3.6.1 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 $H_{1/3}=0.79\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=5.0\text{s}$ 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 $H_{1/3}=0.8\text{m}$ 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た。したがって、アマモ場造成の確実性を高めるためには事前の適地評価が重要で、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られた。なお、1 月の高波浪をアマモの幼体が耐えた理由として、アマモの生長度合いやヤシマットの分解が進んでいなかったことなどが考えられた。

表 3.6.2 月別最大有義波諸元

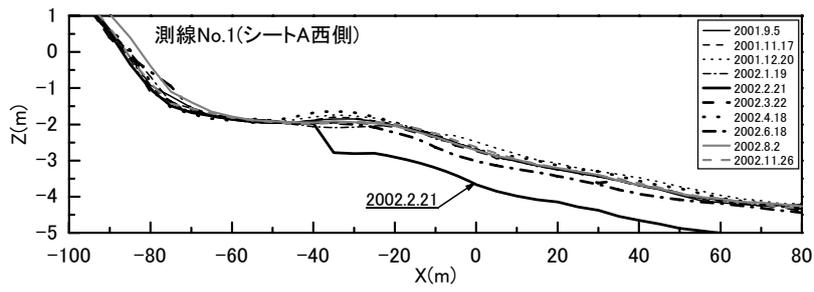
観測年月	$(H_{1/3})_{\max}(\text{m})$	$(T_{1/3})_{\max}(\text{s})$	Wave-direction
2001 年 12 月*	1.04	4.7	WSW
2002 年 1 月	1.37	5.4	SW
2002 年 2 月	0.96	4.6	SW
2002 年 3 月	0.79	5.0	SW
2002 年 4 月	0.67	5.0	SSW
2002 年 5 月	0.43	3.4	SW
2002 年 6 月*	0.74	3.3	SW

※2001.12 と 2002.6 は 1 ヶ月間のうちの一部期間の値

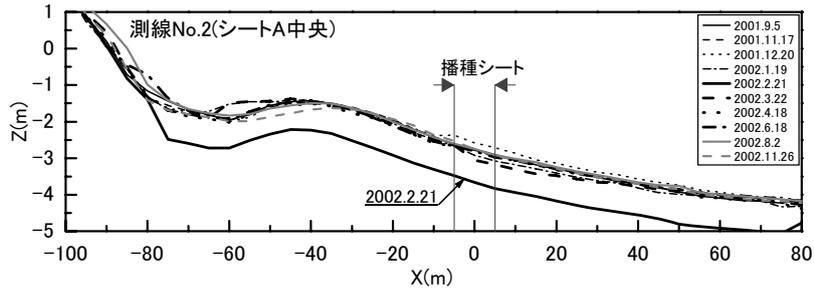
3.6.3 造成初期における海底地形変化の影響

播種シート敷設前の2001年9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 3.5.6**に示したように5本の岸沖方向測線を20m間隔で設け、5m間隔で深浅測量を実施し、地形変化を検討した。深浅測量結果に基づく海底断面形状を**図 3.6.13**に示す。測線No.1~3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、全体的に見れば全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、それが成体でも海底面下10cm程度以浅に根を張るアマモの発芽・生育数に影響したと考えられた。すなわち、2002年2月21日に実施した深浅測量の結果、西側のシートA敷設位置を含む測線No.1~3では平均的な断面形状より0.5m程度の侵食が生じているのが確認されたのに対し、東側のシートB敷設位置である測線No.4およびNo.5では侵食は生じているものの比較的小規模であった。この2002年2月21日の深浅測量の前、2月18日~20日にかけて最大波高 $H_{max}=1.09\text{m}$ 、最大の有義波高 $H_{1/3}=0.62\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=5\text{s}$ 程度、波向きSW~WSWの冬季風浪が来襲しており(**図 3.6.11**, **図 3.6.12**)、この高波浪により上手側の西側のシートA敷設位置付近で侵食が生じたものと考えられた。また、翌3月22日の深浅測量時にはシート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敷設位置では侵食が進行している。この前日3月21日にも有義波高 $H_{1/3}=0.74\text{m}$ の高波浪が来襲しているが、有義波周期 $T_{1/3}$ が4秒程度と2月測量前の高波浪時より周期が短く、高波浪の継続時間も短かったために大きな海底地形の変化は生じなかったと考える。このように隣り合う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で少なく、シートBが多い、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と考えられた。

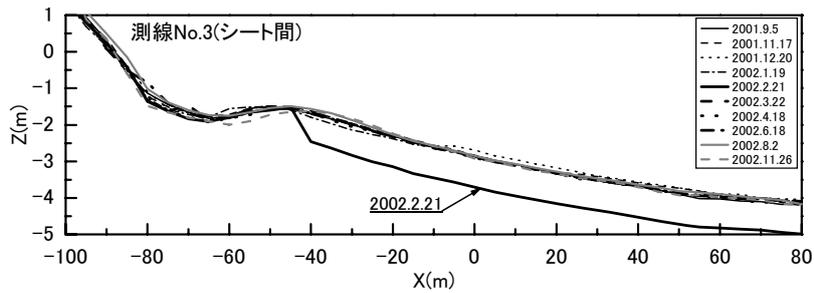
こうした1年間に及ぶ連続的な海底断面形状の変化は、アマモ場の造成地を選定するに当たり、1年毎の同一季節の地形データからその海域の底質の安定性を評価することの危険性を示唆している。すなわち、アマモ場造成においては対象海域の長期的な地形変化に加え、短期的・季節的な変動についても考慮することが重要である。



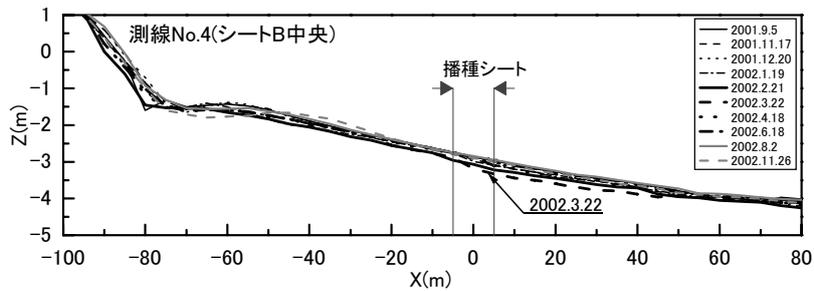
(a) 測線 No. 1 (シート A 西側)



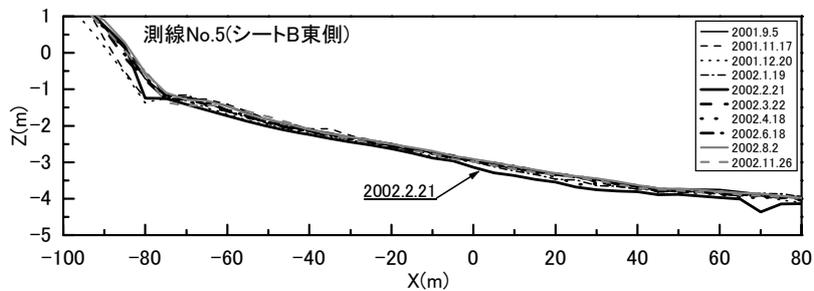
(b) 測線 No. 2 (シート A 中央)



(c) 測線 No. 3 (シート 中央)



(d) 測線 No. 4 (シート B 中央)



(e) 測線 No. 5 (シート B 東側)

図 3. 6. 13 海底断面形状の変化(2001 年 9 月~2002 年 11 月)

3.6.4 アマモ場の経年変化における外力の影響

2001年11月の播種シート敷設から2010年6月に至る継続調査の結果、造成アマモ場とその周辺に拡大した自生アマモ場の繁茂の様子から、当現地試験海域がアマモの生育に適していたことが確認された。しかしながら、図3.6.9に示した造成アマモ場(25m²)の生育密度の経年変化のうち、2005年5月と2009年6月の調査結果がそれぞれ前年の値を下回ったことから、これら調査の前に、当該アマモ場に対して何らかのインパクトが与えられたものと考えられた。アマモ場の成立条件は第2章(図2.3.1)で示したように光量から塩分まで9項目が挙げられているが、造成後10年におよぶ期間で突発的にアマモの生長に影響をおよぼす環境因子は、砂面変動と水温の影響が大きいと考えられる。そこで、砂面変動に対してはその主要因である波高を取り上げ、それと水温について検討した。波高は国土交通省港湾局の全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)から神戸における2002年から2009年の観測結果を用いた(永井・小川, 2004; 永井・里見, 2005; 永井・里見, 2006; 清水ら, 2007; 清水ら, 2008; 河合ら, 2009; 河合ら, 2010; 河合ら, 2011)。水温は日本海洋データセンター(JODS)が提供する定地水温データより神戸港(第五管区海上保安本部 海洋情報部による巡視艇棧橋に設置したセンサーによる測温)の2002年から2008年の日平均値を使用した。

図3.6.14に神戸における2002年1月から2009年12月までの各月における最大の有義波高 $H_{1/3}$ を、図3.6.9に示した造成アマモ場(25m²)の生育密度とともに示す。図3.6.14によれば、2005年5月の造成アマモ場の生育密度が前年の値を下回ったが、その間の2004年8月および9月にはともに表示期間中で最大の3.5m前後の月最大有義波高 $H_{1/3}$ が記録されている。また、2004年12月にも2.64mの月最大有義波高 $H_{1/3}$ が記録されていることから、こうした経年的にまれな高波浪を受けて、アマモ株の流出があったものと考えられ、これが2005年5月調査時の生育密度が前年を下回った理由と考えられた。

2005年5月の調査以降は、2005年9月に2.42mの月最大有義波高 $H_{1/3}$ が記録されているほかは顕著な高波浪は生じてない。しかしながら、造成アマモ場の生育密度は2007年あるいは2008年の調査を境に減少しており、この原因を来襲波浪に求めることはやや難しい。ただし、造成アマモ場の生育密度の低下が著しかった2009年6月の生育密度については、図3.6.6に示したように、前年と比べアマモの分布形状が変化していたことから一時的な底質の移動によりアマモ株が地下茎ごと流失したものと考えられ、これには調査直前の2009年5月に生じた1.79mの月最大有義波高 $H_{1/3}$ が影響した可能性が考えられた。

次に、神戸港の水温に基づいて造成アマモ場の生育密度の減少について検討した。神戸港の水温を月平均水温の年間最大値としてまとめ、造成アマモ場(25m²)の生育密度とともに示したのが図3.6.15である。なお、各年の神戸港の水温を月平均水温の年間最大値は8月あるいは9月に生じていた。図3.6.15によれば、生育密度が前年を下回った2005年の場合、前年の2004年の月平均水温の年間最大値は8月の27.7°Cで例年に比べて特別高いわけでもなく、川崎ら(1988)が示したアマモ場の成立条件である8月の平均水温28°C以下に

も合致しており、この年の造成アマモ場の生育密度の減少の理由とは考え難い。また、2008年あるいは2009年の場合は、前年の2007年の月平均水温の年間最大値は9月の27.9℃、2008年は8月の27.6℃で例年と変わらず、やはりこの造成アマモ場の生育密度の減少の理由とは考え難い。なお、2010年の月平均水温の年間最大値は29℃に達し、翌年の生育密度の減少が懸念された。しかしながら、2011年の造成アマモ場の生育密度は前年の値を若干上回る結果となり、前年の夏場の高水温の影響は大きくなかったと推察された。これは、水温の計測地点である神戸港に比較して、造成アマモ場周辺は流動性が高く、神戸港ほどには水温の上昇がなかったものと考えられた。

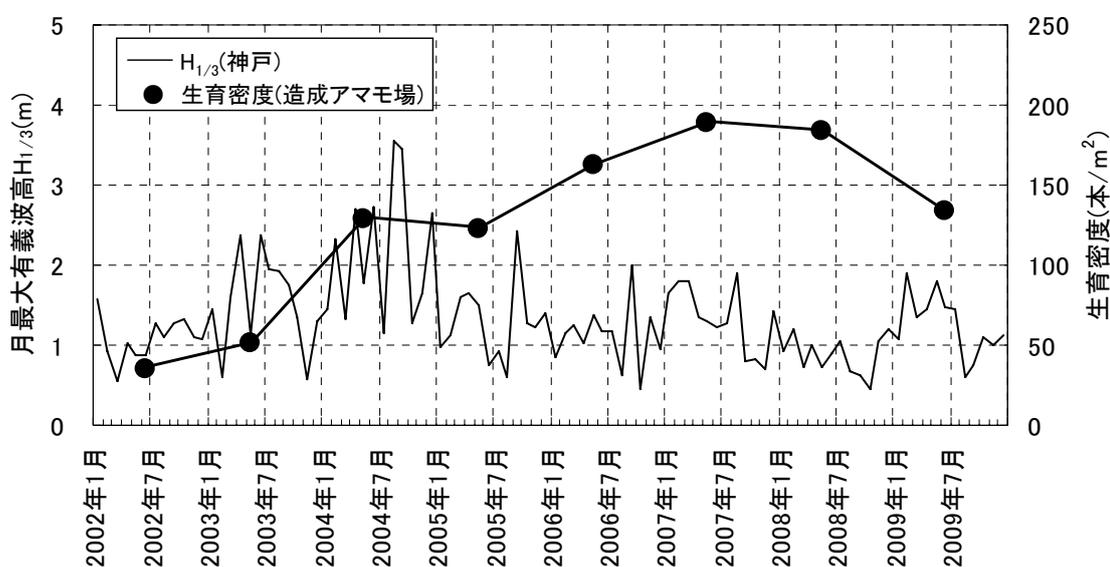


図 3.6.14 月別最大有義波高(NOWPHAS ; 神戸)

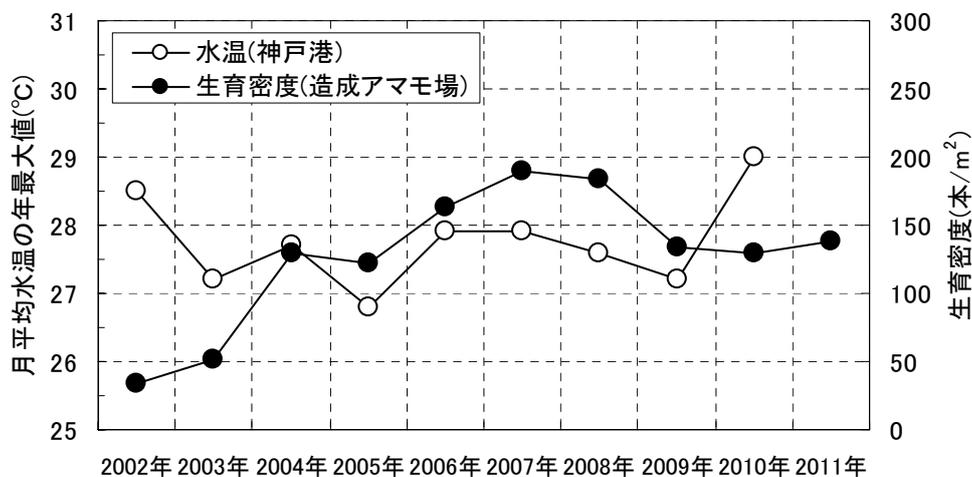


図 3.6.15 月平均水温の年間最大値(JODS ; 神戸)

3.7 まとめ

本章では、既往のアマモ場造成方法をレビューした後、確実なアマモ場造成を目指し、かつ大規模に造成が可能な方法として開発された播種シート工法について述べた。さらに、播種法で重要な要素である健全なアマモ種子の播種するまでの間の取り扱い方法について述べた。そして、大阪湾にごく近い兵庫県明石市の東播海岸地先で実施した「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 10 年近く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明らかにした本アマモ場造成工法の有効性について示した。主要な結論は以下の通りである。

- (1) アマモ場造成法の中核となる播種・移植技術は、栄養株移植、苗移植および種子を播く播種法の 3 つに大別される。
- (2) 栄養株移植は天然のアマモ場から栄養株を採取して移植する方法であり、栄養株の採取と移植がダイバー作業に依存するため、大規模なアマモ場造成にはコストや労力の面で現実的であるとは言い難い。
- (3) 苗移植は、既存のアマモ場から採取した種子から移植に必要なアマモ種苗を人工的に生産して移植する方法であるが、移植作業はダイバー作業によるため、やはり大規模なアマモ場造成にはコストや労力の面で不利である。
- (4) 播種は、既存のアマモ場から採取した種子をアマモの発芽時期である冬季に直接造成現場に播く手法であり、アマモ種子を確実に造成地に固定するための各種手法が検討されている。
- (5) 播種シート工法は、アマモ種子を付着させた生分解性素材のシートを機械的に展張することを前提とし、ダイバーによる水中作業を極力低減させてコスト的にも大規模なアマモ場造成への適用を可能としたものである。
- (6) 播種シートは上部の生分解性不織布と下部のヤシ繊維からなるヤシマットの間にアマモ種子を挟みこみ、さらに播種シートを海底に設置した後のシートの舞上がり防止用と陸上製作時の最後にシートをロール状に巻き取る際の引張りに対する補強部材として菱形金網を生分解性不織布の上に被せた構造とした。さらに、陸上作業中にアマモ種子が乾燥するのを防ぐため、アマモ種子は CMC(カルボキシメチルセルロース)の 5%水溶液に混ぜて扱った。
- (7) アマモ種子の採種は、大量の種子を確保することを考慮すれば、花穂だけ採取するのではなく、花枝ごと採取する方が効率的であった。
- (8) アマモ種子を大量に養生する場合、岸壁に設置して目の前の海水を掛け流した屋外の海水流水槽で、採取したアマモの花枝を水面に浮遊させると効率のよい養生が可能であった。
- (9) アマモ種子の養生には、アマモ種子を十分追熟させることが重要である。

- (10)比較的小規模のアマモ種子の養生であれば、室内での小型水槽を用いて、海水を循環させることで可能である。この場合、人工海水の使用も可能である。
- (11)検討した範囲では、アマモ種子の発芽率からみたアマモ種子の健全性は、室内養生より屋外養生が優れていた。屋外養生では種子の追熟時に日光の直射を受けたこと、常に新鮮な海水を掛け流したことによると考えられた。
- (12)養生後のアマモ種子の保存については、天然の海水をろ過したものを使用して、自然界でアマモ種子が成熟し発芽を待つまでの水温に近い 15~20℃で保存するのが最も適していたが、水温が高いと保存中のアマモ種子への悪影響が懸念される微生物の活動にも好適となることから注意が必要とされた。この対策として、アマモの発芽条件より低い 10℃以下での保存がアマモ種子の健全性をさほど失わずに済み有効である。
- (13)明石市の東播海岸で実施したアマモ場造成試験の結果、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、造成初期の段階で発芽・生育数がかなり少なく、その原因には発芽・幼体期に冬期の高波浪で生じた海底の侵食が考えられた。
- (14)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・生育数は順調に増加し、花枝も確認され、造成したアマモ場が永続的に存続する可能性が示された。
- (15)この造成アマモ場は、造成後 4 年程度経過して生育密度と平均葉長が周辺の天然アマモ場とほぼ同じように生長し、10 年近くが経過した現在も群落を維持している。
- (16)造成アマモ場および天然アマモ場は経年的に生育密度が減少する場合があります、その原因のひとつに台風や冬期の高波浪の影響が認められる場合もあるが、原因が特定できない場合もあった。

なお、東播海岸におけるアマモ場造成は(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実施したことを付記する。

参考文献

- 上野成三・高山百合子・前川行幸・原条誠也(2003)：播種・株植が不要なアマモ移植方法の現地実験，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.1261-1265.
- 宇多高明(1997)：日本の海岸侵食，山海堂，pp.287-289.
- 大本茂之・鳥井正也・三浦俊一・真鍋康司・西村和雄(2005)：岡山県日生町地先の人工アマモ場の拡大，水産工学，Vol.42 No.1，pp.75-78.
- 金澤 剛・森 鐘一(2003)：現地アマモ場造成試験と適地評価に関する研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.1266-1270.
- 河合弘泰・佐藤 真・清水勝義・佐々木誠・永井紀彦(2009)：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2007)，港湾空港技術研究資料，No.1193，93p.
- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二(2010)：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2008)，港湾空港技術研究資料，No.1209，93p.
- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関克己(2011)：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2009)，港湾空港技術研究資料，No.1226，120p.
- 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)：アマモ場造成に関する研究，電力中央研究所報告，総合報告：U14，231p.
- 工藤孝浩・稲田 勉・森田健二・柵瀬信夫・斉田松司(2003)：横浜市地先における播種によるアマモ場造成手法の検討，第 18 回神奈川県水産総合研究所事業発表会要旨集，p.9.
- 国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ(2003)：海の自然再生ハンドブック-その計画・技術・実践- 第 3 巻藻場編，pp.57- 67.
- 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦(2007)：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2005)，港湾空港技術研究資料，No.1161，92p.
- 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦(2008)：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2006)，港湾空港技術研究資料，No.1172，93p.
- (社)マリノフォーラム 21 海洋環境保全研究会浅海域緑化技術の開発グループ (2002)：平成 13 年度浅海域緑化技術の開発に関する報告書(要約)，pp.18-19.
- 水産庁・(社)マリノフォーラム 21(2007a)：アマモ類の自然再生ガイドライン，pp.資-37-資-53.
- 水産庁・(社)マリノフォーラム 21(2007b)：アマモ類の自然再生ガイドライン巻末資料，pp.3-32 - 3-43.
- 高山百合子・上野成三・湯浅城之・前川行幸(2004)：播種・株植が不要なアマモ移植方法の最適移植時期について，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.1181-1185.
- 高山百合子・上野成三・湯浅城之・前川行幸(2005)：播種・株植が不要なアマモ移植方法における移植マットの改良とアマモ定着効果，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.1216-1220.
- 寺田美香里・伊藤哲文・芳田利春・森 鐘一(2000)：播種シートによるアマモ場造成に関する

- る研究(その3), 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, CS-1, pp.2-3.
- 團 昭紀・和泉安洋・森 啓介・広澤 晃・寺脇利信(1998): 底質安定化マットの播種によるアマモの繁茂, 水産工学, Vol.35 No.1, pp.37-42.
- 永井紀彦・小川英明(2004): 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2002), 港湾空港技術研究所資料, No.1069, 89p.
- 永井紀彦・里見 茂(2005): 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2003), 港湾空港技術研究資料, No.1094, 89p.
- 永井紀彦・里見 茂(2006): 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2004), 港湾空港技術研究資料, No.1118, 89p.
- 中瀬浩太・百瀬泰彦(2002): アマモの移植技術, 電力土木, No.298, pp.66-69.
- 日本海洋データセンター: 全国の定地水温データ(オンライン), http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs_data_index.html
- 福田富男・佐藤二郎(1987): 日生町におけるアマモ場造成, 岡山水試報 2, pp.195-200.
- 福田富男(1987): アマモ場造成に関する研究-VIII 播種によるアマモ場造成手法, 2, pp.35-37.
- 山木克則・新保裕美・田中昌宏・越川義功・林 文慶・中村華子・小河久朗(2007): 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1081-1085.
- 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・熊川四郎・森 鐘一・田中裕作・寺田美香里・榎木 亨(1999): 播種シートによるアマモ場造成に関する研究(その2), 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, CS-123, pp.246-247.
- 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.

第4章 アマモ場の造成適地評価手法の開発

4.1 概説

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ている中で、前章で記したようにアマモ場造成に関する様々な手法が開発されてきた。こうした造成手法を適用して効果的なアマモ場造成を実施する為には、どこに移植あるいは播種を行うのか、アマモ場造成の対象海域の各種条件を予め検討して、造成適地を選定する必要がある。すなわち、アマモ場を造成しようとする場所は基本的にアマモが現存しない場所であると考えられるので、その存在しない理由を明らかにし、アマモが生育できる環境を整えてあるいは対象エリアの中で可能な限り環境の整ったエリアを選出してアマモ場造成を実施することが重要である。

アマモ場の外力に対する成立条件に着目した、アマモ場の造成適地の選定に関する研究がいくつかなされている。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考えた。そして、現地観測から岸側のアマモの生育限界が約10cmの底面変化量であることを明らかにした。さらに、水理実験から波と流れの様々な組み合わせに対する砂移動量と外力の関係を検討し、波、流れおよび両者の共存時の漂砂量をシールズ数によって連続的に表現する方法を提案している。そして、この10cm程度の底面変化が生じるときの底面の波動流速が平均的に30cm/s程度であり、その時のシールズ数が0.08であることから、アマモの岸側の生育限界を示す一つの指標としてシールズ数0.08を提案している。また、中瀬ら(1992)は現存するアマモ場についてアマモ分布と底質分布および流況に関する現地調査を行い、さらに同一範囲を対象とした3次元海浜変形シミュレーション結果と比較している。その結果、月に3回程度発生するやや高い波浪を対象とすると検討範囲におけるアマモの分布範囲はシールズ数がおよそ0.5以下の場所に分布しており、シールズ数が0.5を超えるような場所にはアマモはほとんど分布していないことから、アマモの存在範囲を底質条件と物理的外力条件から把握できることを示している。そして、その条件には流速スカラー量7cm/s以下、シールズ数0.6以下、地形変化量-0.5～4.0cm/日を提案している。中瀬・田中(1993)は、この中瀬ら(1992)のアマモ場の推定分布条件を地形条件の異なるアマモ場に適用しその妥当性を検証しており、その条件をそのまま実海域に当てはめた場合に、アマモの分布範囲を概略的に把握できることを示している。しかしながら、中瀬・田中(1993)は、中瀬ら(1992)のアマモ場の推定分布条件はやや過大な範囲を示すとも指摘している。島谷ら(2000)はアマモ種子の底質中への埋没機構の解明を図るため水理実験、現地調査および数値計算を実施して、アマモ種子の沈降速度と摩擦抵抗が周辺底質よりも大きいこと、アマモ種子が海底面下に埋没しやすい周辺底質の移動形態が掃流移動から浮遊移動への遷移過程下であったことから、種子の埋没条件はシールズ数

が 0.15~0.30 程度を提案している。このとき、シールズ数がより小さい場合は底質が動かずに種子が被砂されないこと、シールズ数がより大きい場合には種子が被砂する以前に底面に固定されないことも示している。また、島谷ら(2001, 2002)は人工リーフの設置後にアマモ場が拡大した事例について、数値計算によりアマモ場分布とシールズ数分布を比較して、人工リーフの設置により底質の安定性が向上したことでアマモ場が維持されるようになったとし、アマモ場造成時の適切な外力の制御の必要性を説いている。一方、人工リーフの背後に浮泥が滞留してアマモが存在していない領域が存在したことから、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。出口ら(2005)はアマモ種子の代表粒径と水中比重から算定した種子シールズ数を提案している。そして、2つの海岸でアマモのライフサイクルを考慮した生育可能な水理条件を数値計算により検討し、両海岸とも通常時波浪の入射時に種子シールズ数が 0.2 以上の領域ではアマモが生育していないこと、秋~冬にかけて発生する年に数回程度来襲する高波浪による水深変化量が 1cm/hr 以上の堆積域ではアマモの幼体が埋没・枯死する可能性があること、成熟株の侵食に対する耐性は 2cm/hr 程度であることを示した。また、有田ら(2007, 2008)はアマモの生育過程と波浪による海浜変形を算定するモデルを組み合わせたアマモ場適地選定手法を提案し、現存するアマモ場との比較を行って自生するアマモ場をよく再現したと報告している。また、山木ら(2006)は既存の群落から離れた位置にできた新規群落エリアへの種子の供給機構を明らかにするため、波・流れによる花枝・花穂の輸送と種子の輸送に関する数値シミュレーションを実施して種子の輸送範囲を特定した。そして、種子の加入はあるものの静穏な波浪環境のために種子の埋没が困難と考えられた場所で種苗移植を行い、新規群落形成が可能であることを示した。

こうした既往の研究成果を参考に、ここでは前章で記した播種シートによるアマモ場造成の確実性を向上させて、効率良くアマモ場造成を実施する為には、アマモ場造成の対象海域の各種条件を予め検討して造成適地を選定する必要があると考え、3次元海浜変形計算法を用いたアマモ場造成適地の評価手法を開発し、アマモ場造成を実施した東播海岸谷八木地区に適用して検証した結果(金澤・森, 2003)について述べる。

4.2 造成適地の評価手法

4.2.1 評価手法の構成

第3章に示したように東播海岸谷八木地区における播種シートによるアマモ場造成実海域試験の結果、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)にならい、3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シールズ数を採用した。3次元海浜変形計算法は①エネルギー平衡方程式による平面波浪場の計算、②平面波浪場の計算結果であるラディエーション応力を外力とする運動方程式と連続式による海浜流場の計算、③これらの計算結果を用いて局所漂砂量モデルと漂砂の連続式から地形変化の計算を行うものである。

なお、アマモの生育限界に関する指標としてのシールズ数の適用は、丸山ら(1989)が現地観測結果から直接の生育限界とした地形変化量を生じたときの平均的な底面流速から求めて提案して以来、複数の研究(例えば、中瀬ら、1992 他)で取り上げられて一般にアマモの分布との間に相関が認められているところであるが、本研究では以下の理由によりシールズ数をアマモの生育限界(分布限界)の指標の一つとした。アマモの発芽後、伸長期以降は根の張り具合に応じ、アマモの成長速度に比較して短時間に発生する侵食量が生育限界(分布限界)となる。そこで、この地形変化量あるいは地形変化速度を数値計算により求めてアマモの生育限界(分布限界)の指標とするが、ここで注意を要するのが地形変化量を求める際に使用する漂砂量式が波の一周期間の正味の漂砂量であるということである。すなわち、どれだけ底質粒子が動こうとも、正味の漂砂量が0であれば地形変化は生じない。しかしながら、正味の漂砂量が0でも、シートフロー状に激しく底質が移動を繰り返せば、そこに生育しているアマモが流失することは想像に難くない。したがって、掃流状態、浮遊状態およびシートフロー状態の3つに大別される底質の移動形態において各状態の遷移条件を表すシールズ数は、地形変化量あるいは地形変化速度と併用することでアマモの生育限界(分布限界)に関する指標となり得ると判断したものである。なお、清水ら(1990)によれば、掃流状態から浮遊状態への遷移条件はシールズ数が0.1~0.2、浮遊状態からシートフロー状態への遷移条件はシールズ数が0.5~0.6である。ところで、本検討では播種シートの使用を前提としているので、常にアマモ種子は適切に固定されていると考え、発芽に関する評価は実施しない。

4.2.2 平面波浪場の計算

3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(4.1)を用いた。式(4.1)は砕波によって失われるエネルギーは個々の成分波が持っているエネルギーに比例するとの仮定に基づいている。

$$\frac{\partial(SC_g \cos \theta)}{\partial x} + \frac{\partial(SC_g \sin \theta)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ S \frac{C_g}{C} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right\} = -\varepsilon'_b S \quad (4.1)$$

ここに、 S は波の方向スペクトル、 C_g は波の群速度、 C は波速、 x および y は平面座標、 θ は x 軸の正方向から半時計回りに測った波向き角である。また、 ε'_b は単位時間内に砕波によって失われるエネルギーの逸散率を表し、計算格子内に進入した波が出るまでに要する平均時間に比例すると仮定して、次式で与えられる。

$$\varepsilon'_b = \varepsilon_b C / \sqrt{\delta x \delta y} \quad (4.2)$$

ここに、 δx および δy は x および y 方向の計算格子間隔である。格子内において砕波する波のエネルギーの割合を示す無次元量 ε_b は、格子に流入する波の全エネルギー E_i および流出する波の全エネルギー E_o を用いて次式で表される。

$$\varepsilon_b = (E_i - E_o) / E_i \quad (4.3)$$

高山ら(1991)は砕波後であっても波高は Rayleigh 分布に近い分布形を示すと仮定して、沖波のエネルギーの分布 $p_E(H_s^*)$ ($H_s^* = H/H_{1/3}$)は波高の2乗分布で与え、計算対象格子に入るときの砕波波高と出るときの砕波波高をそれぞれ H_{bi} と H_{bo} として、砕波によってこの格子内で失われるエネルギー ε_b を式(4.3)から次式で算定した。

$$\begin{aligned} \varepsilon_b &= \frac{\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^* - \int_0^{H_{bo}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^*}{\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^*} \\ &= 1 - \frac{1 - \left\{ 1 + \frac{\pi}{4} (\alpha H_{bo} / H_{1/3})^2 \right\} \exp \left[-\frac{\pi}{4} (\alpha H_{bo} / H_{1/3})^2 \right]}{1 - \left\{ 1 + \frac{\pi}{4} (\alpha H_{bi} / H_{1/3})^2 \right\} \exp \left[-\frac{\pi}{4} (\alpha H_{bi} / H_{1/3})^2 \right]} \end{aligned} \quad (4.4)$$

ここに、 $\alpha = H_{1/3} / \bar{H}$ 、 \bar{H} は平均波高である。
 碎波波高 H_b は合田の碎波指標(1991a)から次式で求めた。

$$H_b = AL_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} (1 + 15\beta^{4/3}) \right] \right\} \quad (\beta \geq 0) \quad (4.5)$$

$$H_b = AL_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} \right] \right\} \quad (\beta < 0) \quad (4.6)$$

ここに、 A は係数で高山ら(1991)と同様に 0.17 を採用した。 L_0 は深海波の波長、 \bar{h} は計算格子内の平均水深、 β は海底勾配で、 x 軸の正方向から半時計回りに測った波向き角 $\bar{\theta}$ を用いて次式で与えた。

$$\beta = \beta_x \cos \bar{\theta} + \beta_y \sin \bar{\theta} \quad (4.7)$$

ここに、 β_x 、 β_y は x 軸および y 軸方向の海底勾配で、計算格子内では一様勾配とした。
 計算対象格子に入るときの碎波波高 H_{bi} と出るときの碎波波高 H_{bo} は、計算格子内での碎波波高の変化量 dH_b から次式で求めた。

$$\begin{aligned} H_{bo} &= H_b + dH_b / 2 \\ H_{bi} &= H_b - dH_b / 2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

碎波波高の変化量 dH_b は、波が距離 dl を進む間における碎波波高の変化率 dH_b/dl と計算格子内の平均伝播距離 $dl = \sqrt{\delta x \delta y}$ から求めた。

$$\begin{aligned} dH_b / dl &= -1.5\pi\beta A (1 + 15\beta^{4/3}) \exp \left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} (1 + 15\beta^{4/3}) \right] \quad (\beta \geq 0) \\ dH_b / dl &= 0 \quad (\beta < 0) \end{aligned} \quad (4.9)$$

数値計算では、基礎方程式(4.1)を以下のように書き直し、**図 4.2.1**に示すように格子 (i,j) において差分化して解いた.

$$\frac{\partial(D_s V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(D_s V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(D_s V_\theta)}{\partial \theta} = -\varepsilon'_b S \quad (4.10)$$

ここに,

$$\begin{aligned} D_s &= S \delta f \delta \theta \\ V_x &= C_g \cos \theta \\ V_y &= C_g \sin \theta \\ V_\theta &= \frac{C_g}{C} \left\{ \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (4.11)$$

δf と $\delta \theta$ は波のスペクトルを周波数および波向で分割したときの分割幅である.

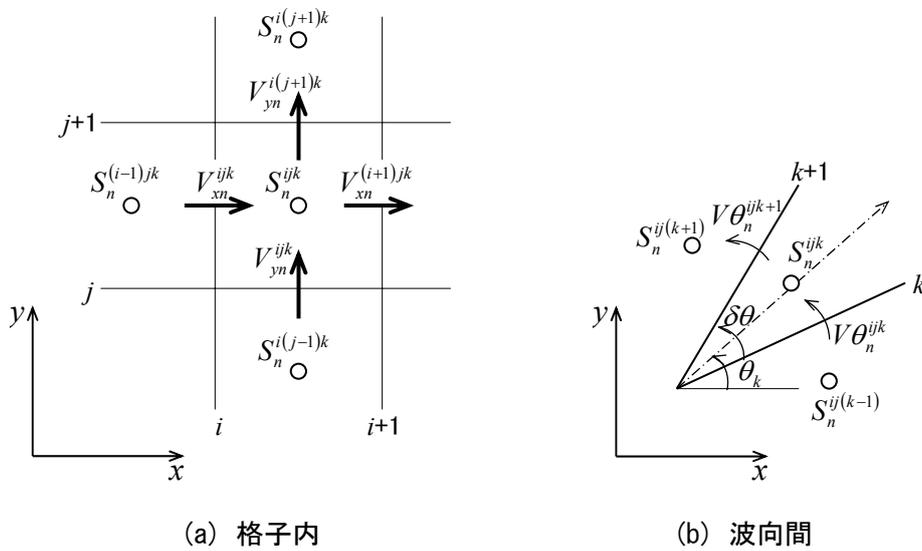


図 4.2.1 成分波のエネルギーの流出入(高山ら, 1991)

計算領域の沖側境界で与える沖波の方向スペクトル $S_0(f, \theta - \theta_p)$ は、周波数スペクトル $S_0(f)$ と方向関数 $G_0(\theta - \theta_p; f)$ の積で表されるとした。なお、 θ_p は主波向きである。

周波数スペクトル $S_0(f)$ には Bretschneider-光易型を採用した。

$$S_0(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^4] \quad (4.12)$$

沖の周波数スペクトルは等エネルギー分割により N 個の周波数成分波に分割した。この場合、周波数成分波のエネルギーは、

$$S_0(f_n) \delta f_n = (0.257 H_{1/3}^2 / T_{1/3}^4) / 4N (1.03 / T_{1/3}^3) \quad (4.13)$$

となり、成分波の周波数 f_n は次式で計算した(合田, 1991b)。

$$f_n = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{\ln[2N / (2n - 1)]\}^{-1/4} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (4.14)$$

方向関数 $G_0(\theta - \theta_p; f)$ には光易型を採用し、区間 $(-\pi/2 + \delta\theta/2) \sim (\pi/2 - \delta\theta/2)$ の間を方向分割数 K を用いて、 $\delta\theta = \pi / (K + 1)$ の角度で等分割した。分割区間内の $G_0(\theta - \theta_p; f)$ $\delta\theta$ の値は区間内で積分することによって求めたが、全領域 $(-\pi/2 \sim \pi/2)$ 内で方向関数の積分値が 1 になるように次式で補正を行った。

$$G_0(\theta - \theta_p; f) = \bar{G} \cos^{2S} \{(\theta - \theta_p) / 2\} \quad (4.15)$$

ここに、

$$\bar{G} = 1 / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} G_0(\theta - \theta_p; f) d\theta \quad (4.16)$$

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f / f_p)^{-2.5} & (f > f_p) \\ S_{\max} (f / f_p)^5 & (f < f_p) \end{cases} \quad (4.17)$$

S_{\max} は方向集中度を示すパラメータで、スペクトルのピーク周波数における S の値である。

4.2.3 海浜流場の計算

海浜流場の計算には，平面波浪場の計算結果からラディエーション応力を外力として，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．すなわち，**図 4.2.2** のように汀線から沖に向かって x 軸，汀線上に y 軸を設けて，水深方向に平均された x 方向の平均流速を \bar{u} ， y 方向の平均流速を \bar{v} ，平均水位変動量を $\bar{\eta}$ ，時間を t として，運動方程式と連続の式は以下のように表される．

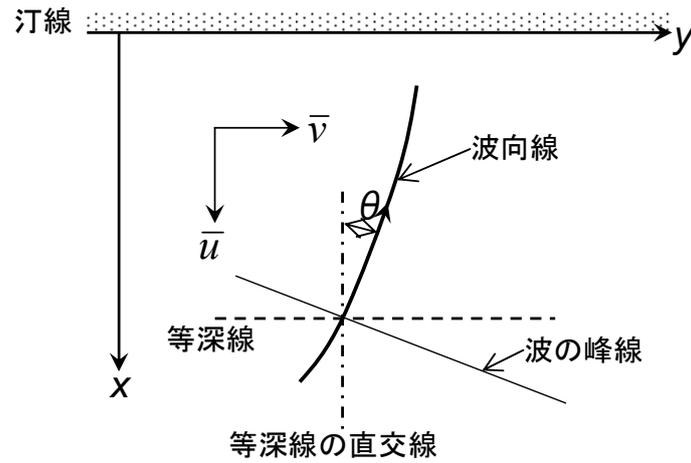


図 4.2.2 海浜流系統における座標系(榎木, 1986 ; 鈴木ら, 1994)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{1}{\rho(h + \bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - F_x + M_x \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{1}{\rho(h + \bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} - F_y + M_y \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \bar{\eta})\bar{u}] + \frac{\partial}{\partial y} [(h + \bar{\eta})\bar{v}] = 0 \quad (4.20)$$

ここに， ρ は海水の密度， h は水深， S_{xx} ， S_{xy} ， S_{yx} ， S_{yy} はラディエーション応力， F_x ， F_y は摩擦項， M_x ， M_y は水平拡散項である．

ラディエーション応力は，波が存在するときの運動量フラックスから静水圧を差し引いたもので，波の存在によって生じる過剰運動量フラックスと定義される．ラディエーション応力は S_{ij} と表された場合， i 軸に垂直な面に作用する j 方向の応力を意味する．式(4.18)および(4.19)の S_{xx} ， S_{xy} ， S_{yx} ， S_{yy} は次式で表される．

$$S_{xx} = E \frac{C_g}{C} \cos^2 \theta + \frac{E}{2} \left(\frac{2C_g}{C} - 1 \right) \quad (4.21)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = E \frac{C_g}{C} \sin \theta \cos \theta \quad (4.22)$$

$$S_{yy} = E \frac{C_g}{C} \sin^2 \theta + \frac{E}{2} \left(\frac{2C_g}{C} - 1 \right) \quad (4.23)$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4.24)$$

ここに、 C_g は群速度、 C は波速、 θ は波向きと x 軸がなす角(図 4.2.2)である。なお、ここでは不規則波を対象とするため、式(4.24)における波高 H には、各応力中に含まれる波のエネルギー密度として不規則波の自乗平均値 \bar{H}^2 を採用し(合田, 1975), 有義波高より次式で算定した。

$$\bar{H}^2 = 0.56 H_{1/3}^2 \quad (4.25)$$

摩擦項 F_x , F_y は本間・堀川(1985)に倣った。

$$F_x = \frac{C_f}{h + \bar{\eta}} \left[\left(W + \frac{w_b^2}{W} \cos^2 \theta \right) \bar{u} + \frac{w_b^2}{W} \cos \theta \sin \theta \cdot \bar{v} \right] \quad (4.26)$$

$$F_y = \frac{C_f}{h + \bar{\eta}} \left[\frac{w_b^2}{W} \cos \theta \sin \theta \cdot \bar{u} + \left(W + \frac{w_b^2}{W} \sin^2 \theta \right) \bar{v} \right] \quad (4.27)$$

ただし、

$$w_b = \frac{\sigma H}{\pi \sinh k(h + \bar{\eta})} \quad (4.28)$$

$$W = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + w_b^2} + 2(\bar{u} \cos \theta + \bar{v} \sin \theta) w_b \right. \\ \left. + \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + w_b^2} - 2(\bar{u} \cos \theta + \bar{v} \sin \theta) w_b \right] \quad (4.29)$$

である。

ここに、 C_f は摩擦係数で0.01とし、 w_b は水粒子速度の代表値、 H は有義波高、 σ は角周波数、 k は波数、 θ は x 軸に対する波向きである。

水平拡散項 M_x 、 M_y は次式で表される。

$$M_x = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (4.30)$$

$$M_y = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \quad (4.31)$$

ここに、 ε は拡散係数で以下のように表される。

$$\varepsilon = N \cdot l \sqrt{g(h + \bar{\eta})} \quad (4.32)$$

ここに、 l は離岸距離、 N は0.016以下の定数とされており、鈴木ら(1994)は0.01を使用しているが、本検討では0.008とした。

数値計算では図4.2.3に示すように、平均水位変動量 $\bar{\eta}_{ij}$ を計算格子の中央で、流速成分 \bar{u}_{ij} 、 \bar{v}_{ij} をそれぞれ x 、 y 軸方向に半格子だけずらし、全て格子線を横切るように定義して、運動方程式および連続の式を差分により解き、その解法にはADI法を用いた。

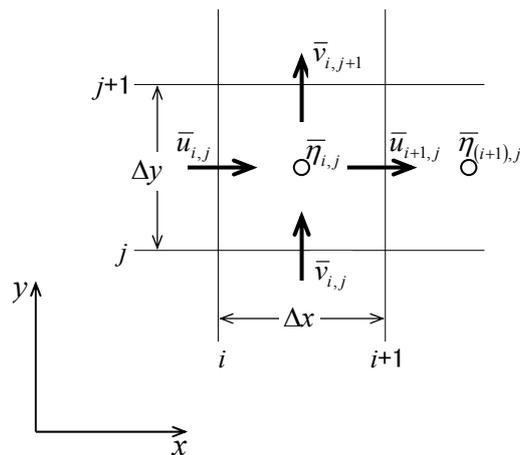


図 4. 2. 3 海浜流計算における計算格子(本間・堀川, 1985 ; 鈴木ら, 1994)

4.2.4 地形変化の計算

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。すなわち、図 4.2.4(本間・堀川, 1985)のように沖から汀線に向かって x 軸、沖側の沿岸方向に y 軸を設けて、 h を静水深、 z_b を任意の高さを基準とした局所的底面高とすると、底面の勾配の影響を考慮した底質量の保存式は次式で表される。

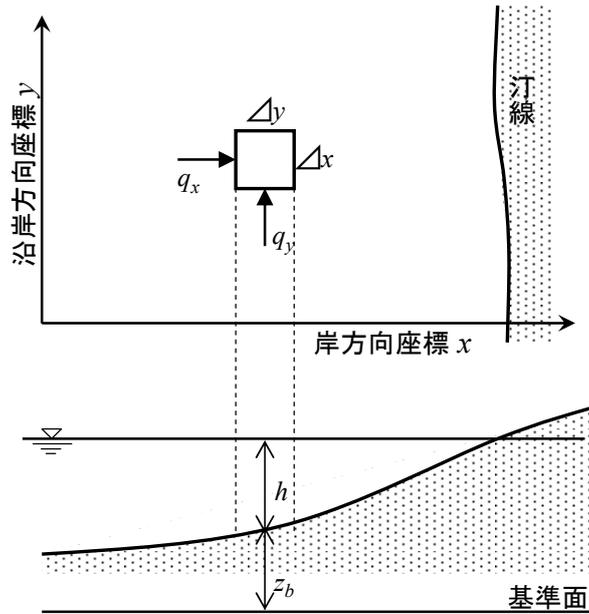


図 4.2.4 地形変化計算における座標系(本間・堀川, 1985)

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \quad (4.33)$$

ここに、 t は時間、 q_x および q_y は鉛直方向に積分された漂砂フラックスの x および y 方向成分であり、 ε_s は正の定数である。

渡辺ら(1984)の局所漂砂量モデルでは、局所的漂砂フラックス(q_x , q_y)を平均流の寄与分(q_{cx} , q_{cy})と波の作用に直接起因する成分(q_{wx} , q_{wy})に分離して扱っている。すなわち、

$$(q_x, q_y) = (q_{cx}, q_{cy}) + (q_{wx}, q_{wy}) \quad (4.34)$$

流れによる漂砂フラックスは本間・堀川(1985)の表記を用いれば次式で表される。

$$q_{cx} = Q_c U, \quad q_{cy} = Q_c V \quad (4.35)$$

$$Q_c = A_c (u_*^2 - u_{*c}^2) / g \quad (4.36)$$

ここに、 U , V は平均流流速の x , y 方向成分であり、 u_* は波と流れの共存場の底面摩擦速度、 u_{*c} は底質の移動限界摩擦速度、 A_c は無次元の係数、 g は重力加速度である。すなわち、流れによる漂砂フラックスは、波と流れによる合成底面摩擦応力が限界値を越えると超過分に比例した量 Q_c の底質が移動状態となり、その底質が平均流によって輸送されるというパワーモデルである。なお、 $u_* \leq u_{*c}$ の場合は $Q_c=0$ とおく。また、この波と流れの共存場の底面摩擦速度 u_* は底質に作用する外力の代表値であるので、摩擦応力の最大値に対応する u_* を使用した。

一方、波による漂砂フラックスも本間・堀川(1985)の表記を用いれば次式で表される。

$$q_{wx} = F_d Q_w \hat{u}_b \cos \alpha, \quad q_{wy} = F_d Q_w \hat{u}_b \sin \alpha \quad (4.37)$$

$$Q_w = A_w (u_*^2 - u_{*c}^2) / g \quad (4.38)$$

$$A_w = B_w \frac{w_0}{(1 - \lambda_v) s \sqrt{s' g d}} \sqrt{\frac{f_w}{2}} \quad (4.39)$$

ここに、 F_d は漂砂方向関数、 \hat{u}_b は底面軌道流速の振幅、 α は波向きが x 軸となす角、 B_w は無次元の係数、 w_0 は底質の沈降速度、 λ_v は底質の空隙率、 s' は底質の水中比重($s' = \rho_s / \rho - 1$, ρ_s と ρ はそれぞれ底質と水の密度)、 d は粒径、 f_w は底面摩擦のうち波の寄与分に対応する摩擦係数である。

漂砂方向関数は次式で表され、正值が波の進行方向、負値が逆方向である。

$$F_d = \tanh \left(\kappa_d \frac{\Pi_c - \Pi}{\Pi} \right) \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} \Pi \equiv \Psi' \frac{h}{L_0} &= \frac{\hat{u}_b^2}{s' g d} \frac{h}{L_0} < \Pi_c \quad (\text{沖向き}) \\ &> \Pi_c \quad (\text{岸向き}) \end{aligned} \quad (4.41)$$

ここに、 κ_d は漂砂の向きの変化点近傍における岸沖漂砂量の変化の程度を規定する量、 Π は漂砂の方向の指標値、 Π_c はその限界値、 Ψ' は波動流強度パラメータである。

底質の移動限界摩擦速度は u_{*c} は、砕波帯内では砕波に伴う強い乱れが水底まで達するため、砕波帯より沖側に比べ底質が移動しやすいと考えると便宜的に砕波帯内の移動限界摩擦

速度を 0 とおいた本間・堀川(1985)にしたがった。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{碎波帯内} : u_{*c} &= 0 \\ \text{碎波帯外} : u_{*c} &= \sqrt{s'gd\Psi_c} \tanh(\kappa_c x_B / X_B) \end{aligned} \quad (4.42)$$

ここに、 Ψ_c は限界シーلز数、 κ_c は無次元係数、 x_B は碎波点より沖向きに取った距離、 X_B は碎波帯の幅である。

限界シーلز数 Ψ_c は粒径 d と振動流境界層の厚さの尺度 δ_L の比より細砂と粗砂に分けて与えた(渡辺, 1979)。また、細砂と粗砂の遷移領域は次の内挿式を用いた。

$$\begin{aligned} \delta_L &= \sqrt{\nu T / \pi} \quad (4.43) \\ \text{(細砂)} \quad d / \delta_L &< 1/6.5 \quad ; \quad \Psi_c \cong 0.11 \\ \text{(粗砂)} \quad d / \delta_L &> 1/4 \quad ; \quad \Psi_c \cong 0.06 \\ \text{(遷移領域)} \quad 1/6.5 &< d / \delta_L < 1/4 \quad ; \quad \Psi_c = 0.190 - 0.52d / \delta_L \end{aligned} \quad (4.44)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 T は周期である。

波・流れ共存場での底面摩擦速度 u_* は、その最大値を \hat{u}_{cw}^* とすれば、以下のように定義される(田中・THU, 1993)。

$$\tau_{0\max} = \rho \hat{u}_{cw}^{*2} = \rho \frac{f_{cw}}{2} \hat{U}_w^2 \quad (4.45)$$

すなわち、

$$\hat{u}_{cw}^* = \sqrt{\frac{f_{cw}}{2}} \hat{U}_w \quad (4.46)$$

ここに、 $\tau_{0\max}$ は波・流れ共存時の底面せん断力の最大値、 ρ は流体の密度、 f_{cw} は波・流れ共存場での摩擦係数、 \hat{U}_w は微小振幅波理論によって得られる波動流速の境界層外縁での最大値である。

また、波・流れ共存場での摩擦係数 f_{cw} には、田中・THU(1993)が提案し、田中・SANA(1996)が修正した全ての flow regime に適用可能な完全陽形式の次式を使用した。

$$f_{cw} = f_2 \{ f_1 f_{cw(L)} + (1 - f_1) f_{cw(S)} \} + (1 - f_2) f_{cw(R)} \quad (4.47)$$

ここに、 f_1 , f_2 は重み関数で、添字の(L), (S), (R) のついた摩擦係数はそれぞれ掃流, 滑面乱流, 粗面乱流時のものである。それぞれの表示式を以下に示す。

$$f_1 = \exp\left\{-0.0513\left(\frac{R}{2 \times 10^5}\right)^{4.65}\right\} \quad (4.48)$$

$$f_2 = \exp\left\{C_1\left(\frac{R}{R_1}\right)^{C_2}\right\} \quad (4.49)$$

$$R = 500R_c + R_w = 500\frac{\bar{u}_c z_h}{\nu} + \frac{\hat{U}_w a_m}{\nu} \quad (4.50)$$

$$R_1 = 0.501\zeta^{1.15} \quad (4.51)$$

$$C_1 = -0.0101 - 0.3469\gamma^{0.2} \quad (4.52)$$

$$C_2 = 2.06 - 1.09\gamma^{0.05} \quad (4.53)$$

$$\zeta = 350\gamma\frac{z_h}{z_0} + (1-\gamma)\frac{\hat{U}_w}{\sigma z_0} \quad (4.54)$$

$$\gamma = \frac{\bar{u}_c / \hat{U}_w}{1 + \bar{u}_c / \hat{U}_w} \quad (4.55)$$

ここに、 R は波・流れ共存場でのレイノルズ数、 \bar{u}_c は定常流断面平均流速、 z_h は水深、 z_0 は粗度長さ、 ν は流体の動粘性係数、 \hat{U}_w は波動による境界層外縁流速の振幅、 $a_m (= \hat{U}_w / \sigma)$ は波動による底面水粒子の軌道振幅、 σ は角振動数である。

掃流に対する摩擦係数 $f_{cw(L)}$ は以下のように表される。

$$f_{cw(L)} = \left\{f_{c(L)}^2 + 2f_{c(L)}f_{w(L)}\cos\phi' + f_{w(L)}^2\right\}^{1/2} \quad (4.56)$$

ここに、

$$f_{c(L)} = \frac{6}{R_c}\left(\frac{\bar{u}_c}{\hat{U}_w}\right) \quad (4.57)$$

$$f_{w(L)} = \frac{2}{\sqrt{R_w}} \quad (4.58)$$

$$\phi' = \cos^{-1}(|\cos \phi|) \quad (4.59)$$

ここに、 ϕ' は波の進行方向と定常流の流下方向がなす角度 ($0 \leq \phi' \leq \pi/2$) である。
粗面乱流に対する摩擦係数 $f_{cw(R)}$ は以下のように表される。

$$f_{cw(R)} = f_{c(R)} + 2\sqrt{f_{c(R)} \cdot \beta_{(R)} f_{w(R)}} \cos \phi' + \beta_{(R)} f_{w(R)} \quad (4.60)$$

ここに、

$$f_{c(R)} = \frac{2\kappa^2}{\{\ln(z_h/z_0) - 1\}^2} \left(\frac{\bar{u}_c}{\hat{U}_w} \right)^2 \quad (4.61)$$

$$f_{w(R)} = \exp \left\{ -7.53 + 8.07 \left(\frac{\hat{U}_w}{\sigma z_0} \right)^{-0.100} \right\} \quad (4.62)$$

$$\beta_{(R)} = \frac{1}{1 + 0.769\alpha^{0.830}} \left\{ 1 + 0.863\alpha \exp(-1.43\alpha) \left(\frac{2\phi'}{\pi} \right)^2 \right\} \quad (4.63)$$

$$\alpha = \frac{1}{\ln(z_h/z_0) - 1} \frac{\bar{u}_c}{\hat{U}_w} \quad (4.64)$$

ここに、 κ はカルマン定数である。

滑面乱流に対する摩擦係数 $f_{cw(S)}$ は以下のように表される。

$$f_{cw(S)} = f_{c(S)} + 2\sqrt{f_{c(S)} \cdot \beta_{(S)} f_{w(S)}} \cos \phi' + \beta_{(S)} f_{w(S)} \quad (4.65)$$

ここに、

$$f_{c(S)} = \exp \left\{ -7.60 + 5.98 R_c^{-0.0977} \right\} \left(\frac{\bar{u}_c}{\hat{U}_w} \right)^2 \quad (4.66)$$

$$f_{w(S)} = \exp \left\{ -7.94 + 7.35 R_w^{-0.0748} \right\} \quad (4.67)$$

$$\beta_{(s)} = \frac{1 + 0.871R_c^{-0.0362} f_{c(s)}^{0.177} (2\phi'/\pi)^{2.5}}{1 + 5.04R_c^{-0.0303} f_{c(s)}^{0.379}} \quad (4.68)$$

底面軌道流速の振幅 \hat{u}_b について、本間・堀川(1985)は、一般の重合波浪場を対象に各点での波動が 2 つの進行波成分の重合によるものと仮定し、波の場の計算結果からそれぞれの成分波を分離して、それぞれに対して単一進行波としての底面軌道流速振幅 \hat{u}_b を求め、式(4.37)、(4.38)により漂砂フラックス成分を計算した後、両者を合成する方法を示している。しかしながら、ここでは波浪場の計算を構造物からの反射を考慮していないエネルギー平衡方程式を使用していることなどから、底面軌道流速の振幅 \hat{u}_b は次式で求めた。

$$\hat{u}_b = \frac{\sigma H}{2 \sinh(kh)} \quad (4.69)$$

ここに、 H は波高、 k は波数である。

計算には図 4.2.5 に示すように、底面高 z と漂砂フラックス q_x, q_y を半格子ずらしたスタaggered・メッシュ・スキームを使用し、基礎方程式を差分により解いた。

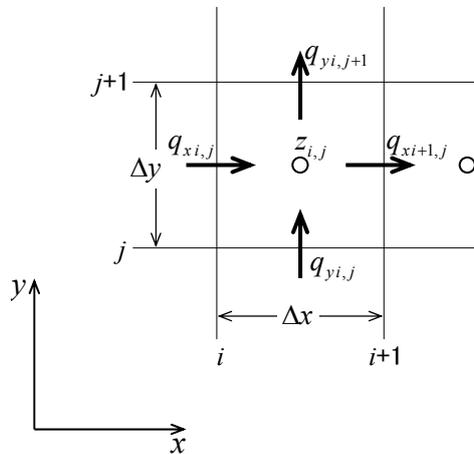


図 4.2.5 地形変化計算における計算格子(本間・堀川, 1985)

4.2.5 シールズ数の計算

アマモの生育限界の指標として使用するシールズ数 Ψ は、田中・THU(1993)および田中・SANA(1996)の算定方法で求めた波・流れ共存場での摩擦係数式(4.47)を用いて次式で評価した。

$$\Psi = \frac{1}{2} \frac{f_{cw} \hat{u}_b}{s'gd} \quad (4.70)$$

ここに、 f_{cw} は波・流れ共存場での摩擦係数、 \hat{u}_b は底面軌道流速の振幅(式 4.69)、 s' は底質の水中比重($s' = \rho_s / \rho - 1$, ρ_s と ρ はそれぞれ底質と水の密度)、 g は重力加速度、 d は粒径である。

4.3 東播海岸における検証

4.3.1 計算条件

第3章で示した播種シートによるアマモ場造成実海域試験を実施した東播海岸谷八木地区前面海域を対象に、本適地選定手法を適用して天然アマモ場の分布ならびに播種シート敷設後の造成アマモ場の状況から本適地選定手法の適用性を検証した。

解析対象波浪は2001年12月から2002年6月の現地波浪観測結果(播種シートのすぐ沖側で計測したNo.2波高計;図3.5.6,表3.6.2)を参考に、冬期の最大波程度として $H_{1/3}=1.4\text{m}$, $T_{1/3}=6.0\text{s}$, 波向きSWとした。また、表3.6.1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影響を与えたと考えられた、この期間中の有義波高の最大値を参考に $H_{1/3}=0.8\text{m}$, $T_{1/3}=5.0\text{s}$, 波向きSWも対象とした。なお、この $H_{1/3}=0.8\text{m}$ 程度の波は、冬期の当該海域には比較的良好に来襲しており、ここでは冬期高波浪と称することとする。解析対象領域の水深分布(平均潮位0.7mを含む)とおおよそのアマモの自生範囲および播種シート敷設位置を図4.3.1に示す。また、撮影時期が異なるが、2004年5月に撮影した現地の空中写真を写真4.3.1に示す。写真4.3.1中にもおおよその播種シート敷設位置を示した。現地調査によると離岸堤背後にはアマモのほか、ワカメなどの海藻も認められているため、全てがアマモとは断定できないが、離岸堤背後の色の濃い部分が自生アマモと考えられる。なお、西側(写真中右側)突堤から汀線近くに伸びる黒い部分はアオサ他の流れ藻である。さらに、東側(写真中左側)突堤の更に左側の海域は礫で養浜された礫浜であり、広く黒く見える部分がアマモか否か確認されていない。

計算条件一覧を表4.3.1に示す。底質の中央粒径は現地調査結果に基づいて0.3mmとした。計算格子は波浪場の計算、海浜流場の計算および地形変換計算で同一とした。また、地形変化の計算に当たっては、各種係数を設定する必要がある。今回使用した諸係数を表4.3.2に示す。

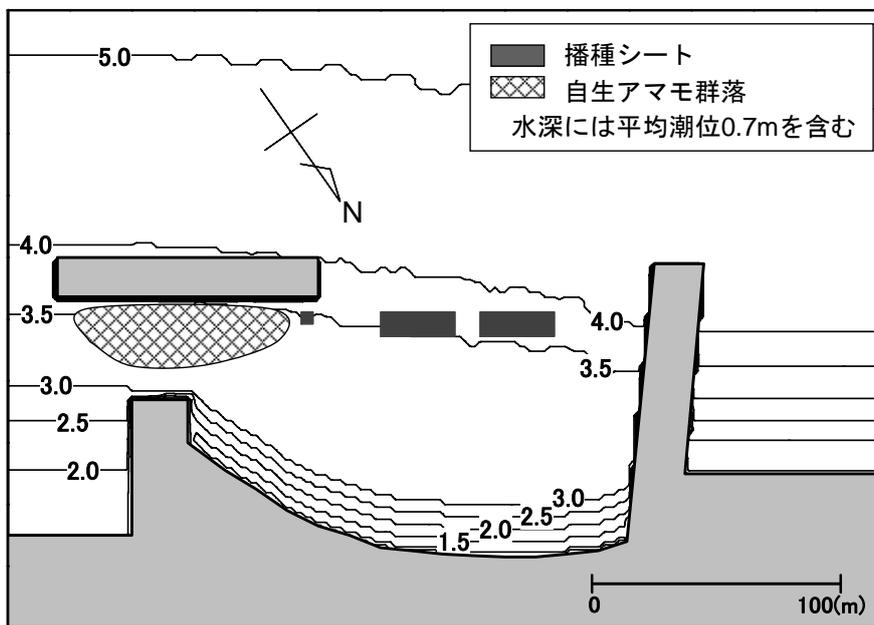


図 4. 3. 1 計算対象領域の水深分布図



写真 4. 3. 1 東播海岸谷八木地区地先のアマモ場(2004年5月撮影)

表 4.3.1 計算条件一覧

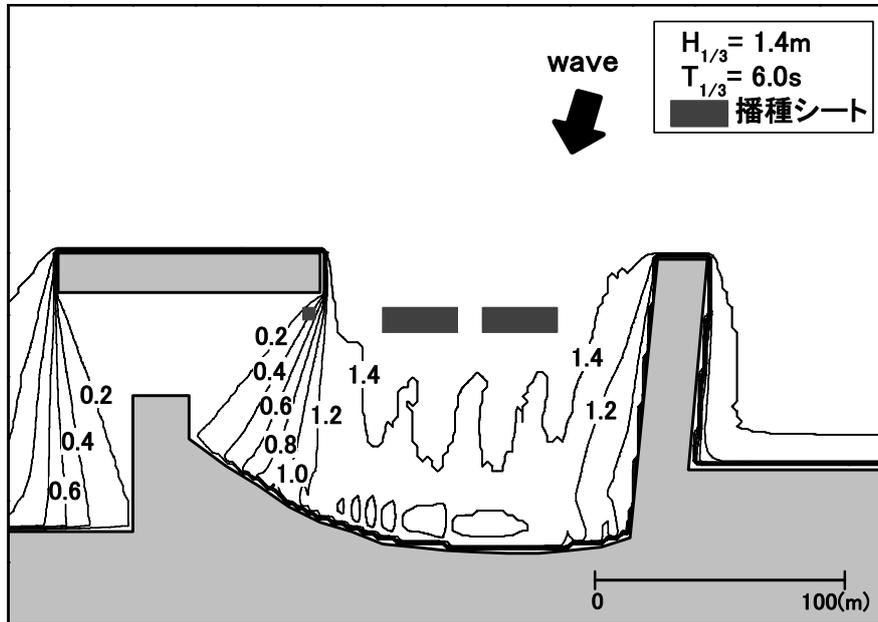
	冬期最大波	冬期高波浪
有義波高 $H_{1/3}$ (m)	1.4	0.8
有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	6.0	5.0
波向き	SW	SW
Smax	75	75
計算格子 DX=DY (m)	2.0	2.0
方向分割数	36	36
周波数分割数	10	10
海浜流計算時間刻み (s)	0.05	0.05
海浜流計算時間刻み (s)	5.0	5.0
底質の中央粒径 (mm)	0.3	0.3
底質の密度 (kg/m^3)	2.65×10^3	2.65×10^3
海水の密度 (kg/m^3)	1.03×10^3	1.03×10^3

表 4.3.2 地形変化計算における諸係数

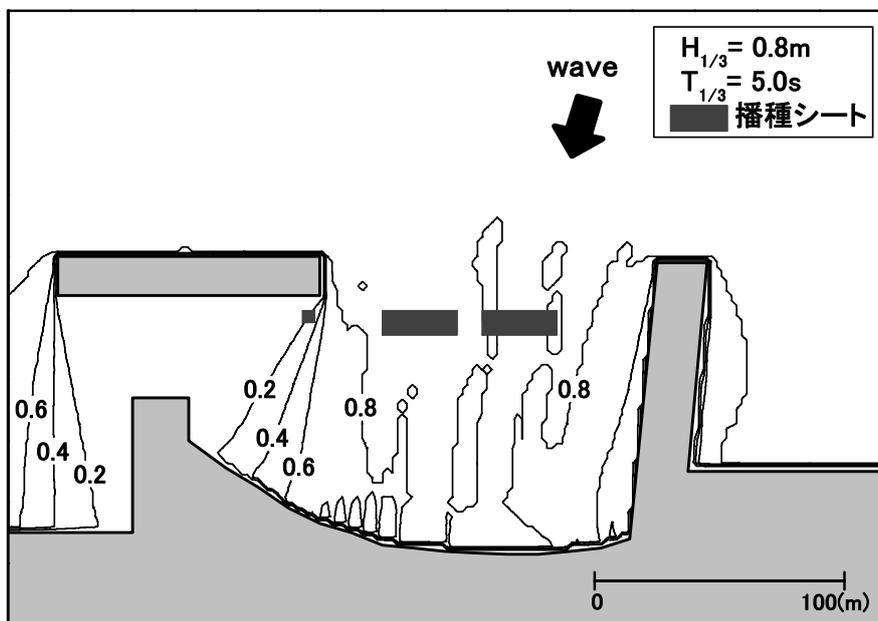
項 目	式	記号	設定値	出典等
海底勾配による無次元拡散係数	4.33	ε_s	10.0	渡辺ら(1984)
流れ漂砂量式の無次元係数	4.36	A_c	2.0	清水ら(1990)
波漂砂量式の無次元係数	4.39	B_w	3.0	清水ら(1990)
底質の空隙率	4.39	λ_v	0.4	清水ら(1990)
漂砂の向きの変化点近傍における 岸沖漂砂量の変化の程度を規定する量	4.40	κ_d	2.0	渡辺ら(1984)
漂砂の方向指標限界値	4.40	Π_c	0.16	渡辺ら(1984)
碎波帯外底質の移動限界摩擦式の無次元係数	4.42	κ_c	1.0	本間・堀川(1985)

4.3.2 計算結果

波浪場の計算結果として、それぞれの波浪条件に対する有義波高分布を図4.3.2に示す。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。入射波条件とした与えた入射波高は、離岸堤と突堤の間に敷設した播種シートのすぐ沖側での計測結果に基づいているが、入射波高は播種シート敷設位置よりもかなり汀線寄りにまで進入していることが示されている。一方、離岸堤背後に敷設した5m×5mの播種シートの位置は、離岸堤の遮蔽効果の影響範囲であることがわかる。冬期最大波の入射波高 $H_{1/3}=1.4\text{m}$ および冬期に比較的良く来襲する高波浪(冬期高波浪)の入射波高 $H_{1/3}=0.8\text{m}$ に対して、5m×5mの播種シートの敷設位置における有義波高はともに0.2~0.4m程度とかなりの減衰が認められた。なお、今回の波浪変形計算で用いたエネルギー平衡方程式は、厳密な意味では回折の効果を含んでいないが、回折が顕著な領域を除けば実用的には適用可能であることが確認されている(土木学会海岸工学小委員会, 1994)。高山ら(1991)は、防波堤開口幅 B が比較的広い $B/L=8$ の場合について、回折計算結果とエネルギー平衡方程式の計算結果を比較し、方向集中度に関係なく両者の値はよく一致することを示した。また開口幅が狭い $B/L=2$ の場合の検討では、両者の差がやや広がるものの、大きくは異ならないと報告している。今回、計算対象とした東播海岸谷八木地区の離岸堤と突堤の開口幅 B が約130mに対して、水深5mにおける周期5秒の波の波長 L は30.29m、周期6秒のそれは37.07mであり、 B/L はそれぞれ4.3と3.4である。高山ら(1991)の検討結果からすれば、離岸堤背後の5m×5mの播種シート敷設位置における有義波高の計算結果も妥当であると考えられた。



(a) 冬期最大波

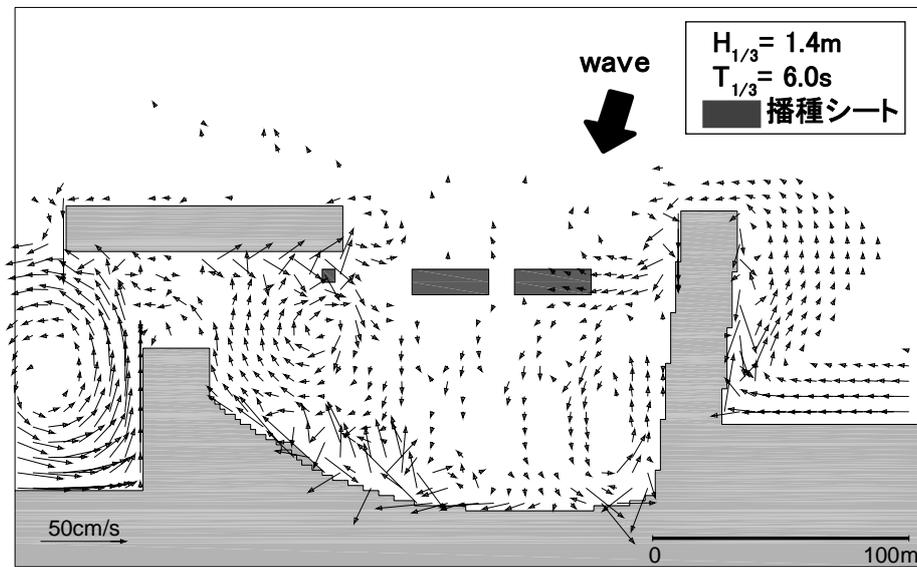


(b) 冬期高波浪

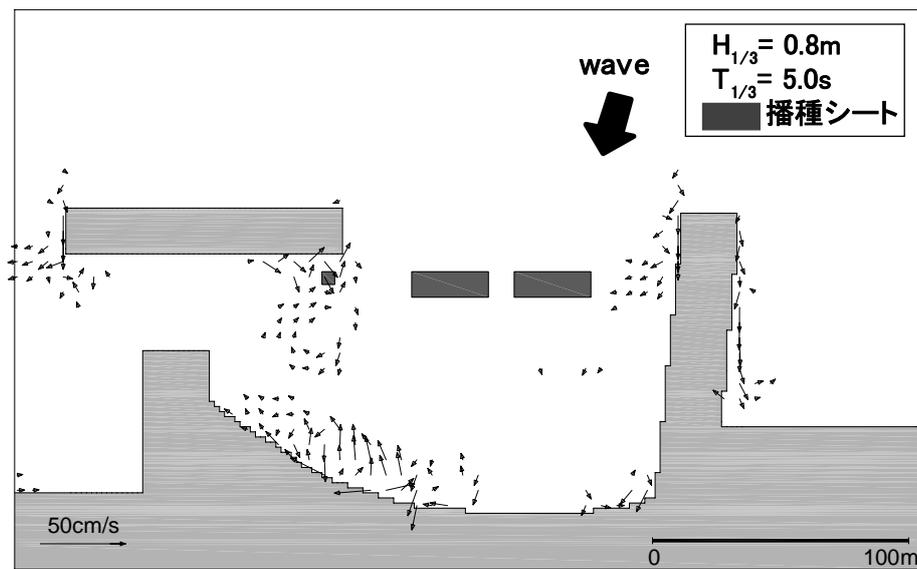
図 4.3.2 有義波高の計算結果

海浜流の計算結果として、計算開始後ほぼ定常に達した海浜流ベクトル分布を図 4.3.3 に示す。これにおいても図中の黒く塗り潰した領域は、播種シートのおおよその敷設位置である。冬期最大波の場合、計算対象領域全体に海浜流が形成されている。特に 2 つの突堤に挟まれた海浜の汀線付近の海底勾配が比較的急な水深が 3m 以浅の領域で、東側(図の左側)の突堤に向かう流れが強化されている。そして東側の突堤に達した流れは、その沖側の離岸堤に向かい、離岸堤と海岸と東側の突堤で囲まれた区域で時計回りの還流を形成している。汀線付近の流速は数 10cm/s 程度の大きさが計算されているが、この還流の流速は最大でも 10cm/s 程度である。こうした汀線付近の東側突堤に向かう流れは、宇多(1997)が指摘した当海岸の沿岸漂砂の方向と一致している。

一方、冬期高波浪の場合は、冬期最大波の場合に比べて、形成される海浜流場は全体に弱い。汀線に近い水深が 3m 以浅の領域で、2 つの突堤に挟まれた海浜の東側(図の左側)に東側の突堤に向かう傾向の流れが比較的早いのが特徴的であるが、その大きさは 10cm/s 前後である。また、離岸堤背後の 5m×5m の播種シート付近にはごく弱い時計回りの渦が見られ、この播種シートは渦の北端に位置している。



(a) 冬期最大波



(b) 冬期高波浪

図 4.3.3 海浜流の計算結果

波浪場および海浜流場の計算結果をもとに、波・流れ共存場での摩擦係数(田中・THU, 1993; 田中・SANA, 1996)を用いて算定したシールズ数の平面分布を図4.3.4に示す。図中、ハッチを掛けた領域は、中瀬ら(1992, 1993)が示したアマモの分布範囲とシールズ数の関係を参考に、比較的アマモの生育が期待されると判断したシールズ数が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。

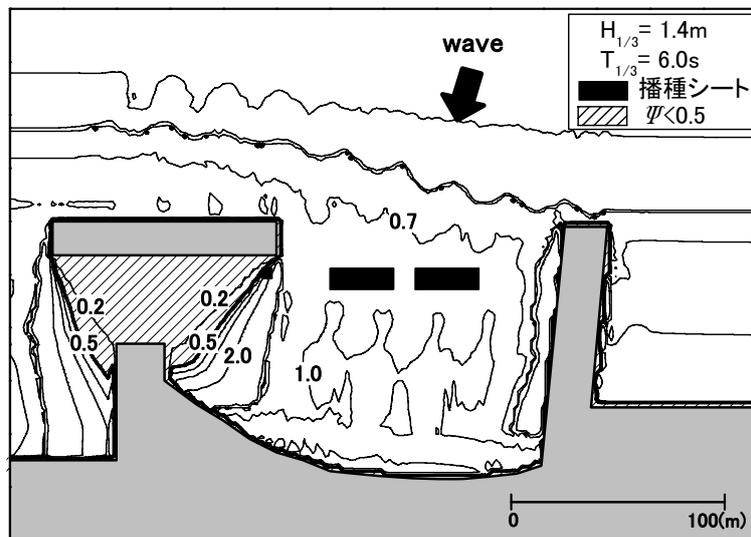
当海域でアマモが多く自生している領域は離岸堤の背後で突堤との間の領域であり、この領域のシールズ数は、来襲波浪によらず0.2以下であった。したがって、この海域ではシールズ数が常に0.2以下であれば、アマモ群落が経年的に存在し得ると考えられる。このシールズ数0.2以下は、清水ら(1990)のシールズ数による漂砂の移動区分によれば掃流状態である。

一方、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シールズ数は $H_{1/3}=0.8\text{m}$ 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く、シールズ数による漂砂の移動区分によればシートフロー状態である。したがって、自生のアマモもなく、播種シートの敷設後も発芽・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。

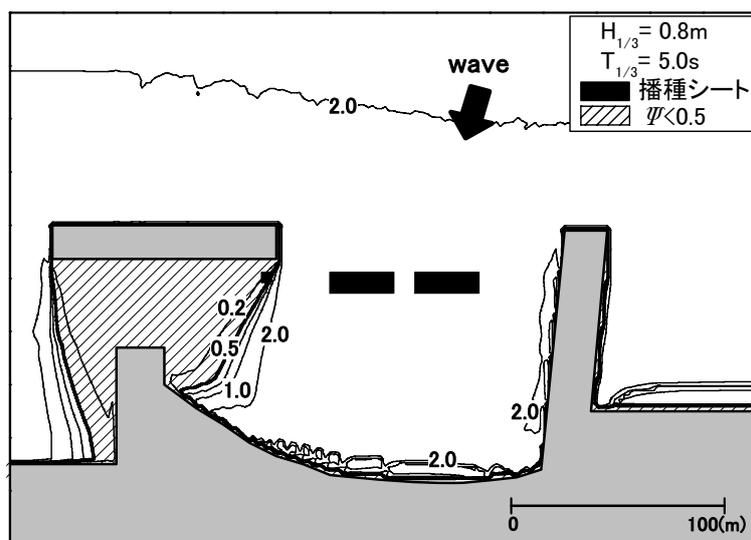
中瀬ら(1992)は千葉県富津市竹岡海岸におけるアマモ場を対象とした現地調査と、年平均有義波高よりもやや条件の厳しい月に3回程度来襲する波浪を対象とした数値計算により、漂砂の移動形態(シールズ数 Ψ の範囲)および侵食・堆積傾向別にアマモの分布の有無を検討している。それによると、堆積傾向にある領域では漂砂がシートフロー状態($0.5 < \Psi$)でもアマモは僅かに分布しているが、アマモが最も分布していたのは漂砂が浮遊状態($0.2 < \Psi < 0.5$)であり、侵食傾向にある領域では漂砂がシートフロー状態($0.5 < \Psi$)では見られないことを報告している。今回の検討で対象とした波浪条件は、中瀬ら(1992)の月に3回程度来襲する波浪とは異なるが、この東播海岸谷八木地区におけるアマモの分布も中瀬ら(1992)と似たシールズ数の値によって評価できることがわかった。

さらに、アマモの発芽・生育数が順調に増加した $5\text{m} \times 5\text{m}$ の播種シートを敷設した離岸堤端部背面でのシールズ数は、 $H_{1/3}=0.8\text{m}$ の場合は0.5程度、 $H_{1/3}=1.4\text{m}$ の場合は0.5よりやや大きく、清水ら(1990)のシールズ数による漂砂の移動区分によればシートフロー状態に近い状態である。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。そして、その後10年近くにわたって群落を維持したことから、高波浪時に底質がシートフロー状態で移動するような場所でも、最初に核となるパッチ状の群落が形成されれば、その群落は維持され、拡大していくことが可能と考えられる。

このように、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、アマモのための環境緩和の必要性が認められた。アマモのための環境緩和の一方策として、播種シート工法が有効であることが示された。また、現在の環境や環境緩和の効果はシールズ数で評価が可能であることが明らかとなった。



(a) 冬期最大波



(b) 冬期高波浪

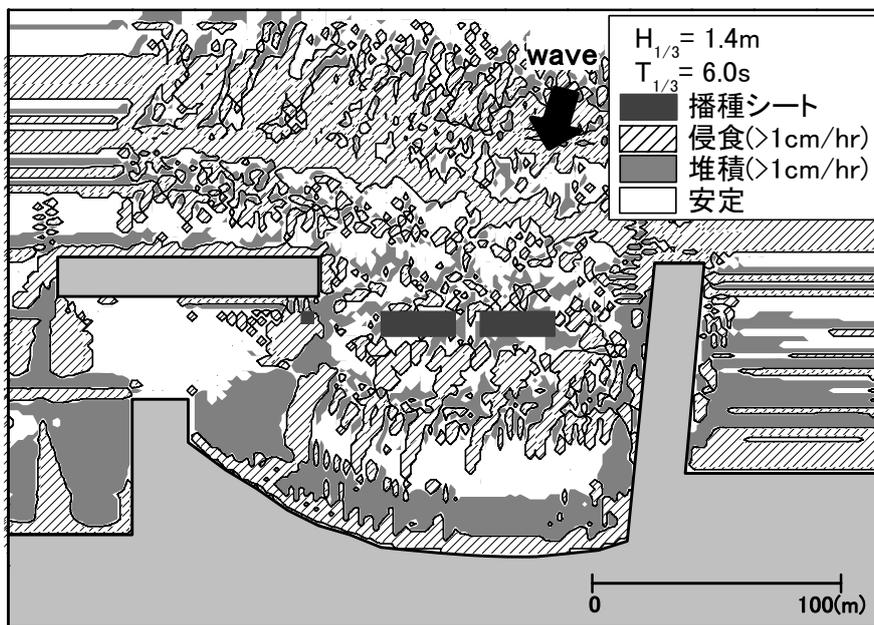
図 4.3.4 シールズ数の平面分布

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 4.3.5 に示す．図中，ハッチを掛けた領域は 1cm/hr 以上の侵食速度の侵食領域を，濃い灰色の領域は 1cm/hr 以上の堆積速度の堆積領域を表す．また，空白の領域は侵食速度と堆積速度がともに 1cm/hr 以下の領域を安定領域として示した．

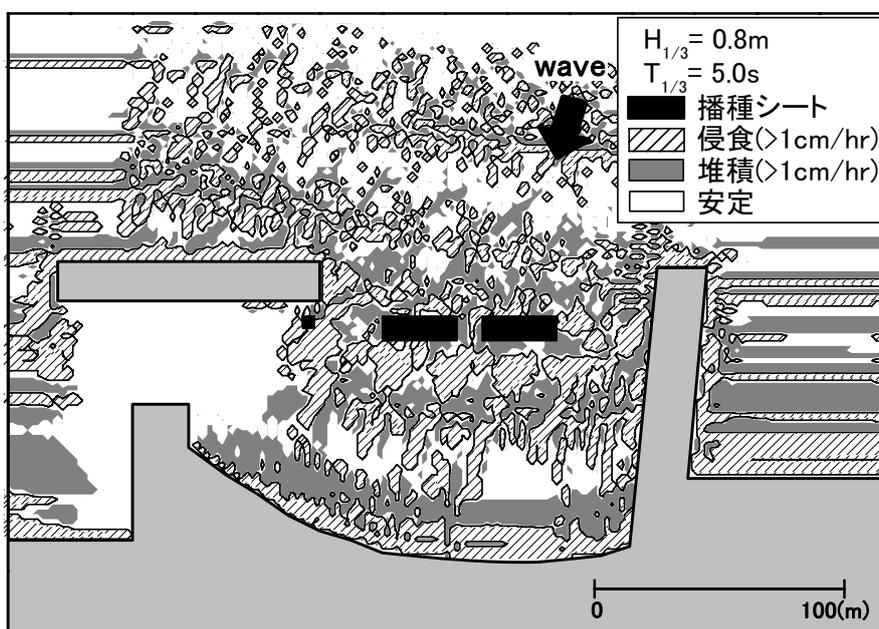
冬期最大波を対象とした計算結果では，突堤と離岸堤間の開口部における播種シート敷設位置は堆積域と侵食域，安定域が混在しており，この結果からだけでは，1 枚が 10m×30m という大きさの播種シートを敷設するのに適していたか否か評価するのは難しい．一方，離岸堤端部背後の 5m×5m の播種シート敷設位置は侵食域となっている．もともと，アマモが自生していなかった理由の一つと考えられ，多少の侵食域でも播種シートによりアマモ場が造成可能なことを示した好例といえる．天然のアマモが自生している離岸堤背後の領域は比較的安定域が広がっているが，その東西両側には侵食域が存在しており，この冬期の最大波程度の高波浪による侵食が，自生アマモ場の拡大を阻む一因となっている可能性が考えられた．

一方，冬期高波浪時の地形変化量でも突堤と離岸堤間の開口部における播種シート敷設位置は堆積域と侵食域，安定域が混在しており，離岸堤端部背後の 5m×5m の播種シート敷設位置は侵食域で冬期最大波を対象としたときと傾向は変わらない．一方，アマモが自生している離岸堤背後では安定域が広く広がっており，自生アマモの存在範囲と似た形状を示している．

このように，地形変化速度の分布とアマモ場の分布の対応から地形変化速度も適地評価の指標となりうると考えられた．また，その適地評価の中に，播種シートの侵食に対してアマモ場を形成し維持する効果を加味することも可能だと考えられた．



(a) 冬期最大波



(b) 冬期高波浪

図 4.3.5 地形変化速度の平面分布

4.3.3 アマモ場造成の適地評価

これまでの検討結果に基づき、播種シートを用いてアマモ場造成を行う際に播種シートの敷設場所を決めるための適地判定を試みた。評価項目にはシールズ数と地形変化速度に加え、アマモの生長に必要な光を左右する水深を取り上げた。

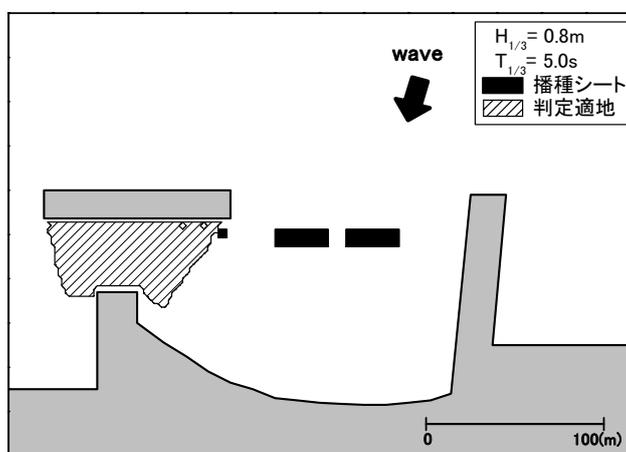
冬期に比較的良く来襲する高波浪(冬期高波浪)として設定した入射波高 $H_{1/3}=0.8\text{m}$ 、入射波周期 $T_{1/3}=5.0\text{s}$ に対して、当海域をこれらの項目で評価した結果を図 4.3.6 に示す。図中、ハッチを掛けた領域が、水深とシールズ数および地形変化速度の制限をすべて満たす領域である。評価の制限値を、水深は東播海岸でアマモが自生している 2~3m(潮位を含まず)、シールズ数は図 4.3.4 より 0.2 以下、地形変化速度は図 4.3.5 より $\pm 1\text{cm/hr}$ 以下とした場合の図 4.3.6(a) では、ハッチを掛けた領域が離岸堤背後に自生しているアマモの分布範囲によく一致している。しかしながら、安定したアマモ場が造成された離岸堤端部背後の $5\text{m} \times 5\text{m}$ の播種シート敷設位置はこの条件からはやや外れている。そこで、播種シートによるアマモ種子の固定と地形変化に関する環境緩和を加味して、シールズ数と地形変化速度の制限を緩和したところ、シールズ数が 0.5 以下、地形変化速度が $\pm 3\text{cm/hr}$ 以下ならば、 $5\text{m} \times 5\text{m}$ の播種シート敷設位置もこれら 3 条件を満たす領域に含まれることが確認された(図 4.3.6(b))。これらより、水深とシールズ数および地形変化速度に適切な条件を設定すれば、アマモ場の自生範囲および播種シートによるアマモ場造成の適地を判定できると考えられた。

同様に、入射波条件が厳しくなる冬期最大波($H_{1/3}=1.4\text{m}$, $T_{1/3}=6.0\text{s}$)について検討した結果を図 4.3.7 に示す。評価の制限値を、水深が 2~3m(潮位を含まず)、シールズ数は 0.2 以下、地形変化速度は $\pm 1\text{cm/hr}$ 以下とした図 4.3.7(a) でも、ハッチを掛けた領域は離岸堤背後に自生しているアマモの分布範囲によく一致した。こうしたことから、この海域のアマモの自生範囲は、波浪条件に関わらず、水深を 2~3m(潮位を含まず)、シールズ数 0.2 以下、地形変化速度 1cm/hr 以下の条件で推定可能と考えられた。一方、 $5\text{m} \times 5\text{m}$ の播種シート敷設位置は、冬期高波浪に対して有効であったシールズ数を 0.5 以下、地形変化速度を $\pm 3\text{cm/hr}$ 以下としても、これら条件を満たす領域に完全には含まれず、一部がその領域の外縁に接するのみであった(図 4.3.7(b))。そこで、さらにシールズ数の制限を 0.7 以下に緩和したが、その結果は大きくは改善されず、 $5\text{m} \times 5\text{m}$ の播種シート敷設位置はそれら 3 条件を満たす領域の外縁に接する程度が若干増大した程度であった(図 4.3.7(c))。

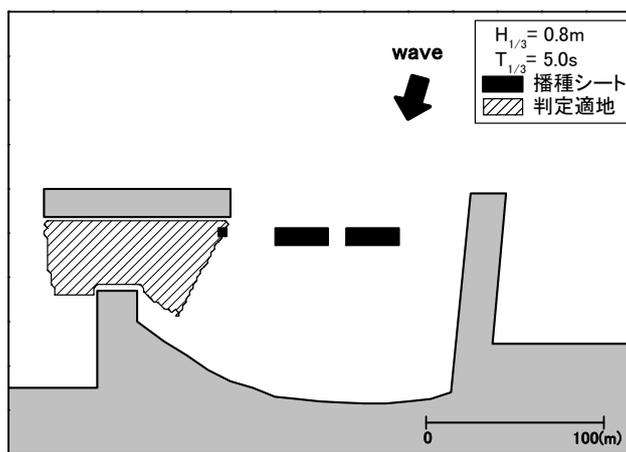
さらに制約条件を緩和して、この $5\text{m} \times 5\text{m}$ の播種シート敷設位置を満たす条件を得ることは可能ではある。しかしながら、余りに緩和された条件では、それら制限値が物理的な意味を成さないと考えられる。そこで、この東播海岸においては、播種シートのアマモの生育に対する環境緩和効果を加味して、播種シートの敷設適地すなわち播種シートによるアマモ場造成適地は、水深を 2~3m(潮位を含まず)、シールズ数 0.5 ないし 0.7 以下、地形変化速度 3cm/hr 以下の条件を満たす領域と提案することは妥当と考えられた。すなわち、これらの条件を満たす領域に播種シートを敷設すると、アマモが群落を形成する可能性が

高いと判断された。

東播海岸においては、自生アマモの分布および播種シートによるアマモ場造成の実績から、水深とシールズ数および地形変化速度によって、アマモ場の造成適地が判定された。今後、同海域に播種シートを敷設する場合は、これらの条件を満たす領域に敷設すれば確実性の高いアマモ場造成が期待される。一方、他海域においても、これらの条件は似た値が設定可能と予測されるが、対象海域にアマモ場が自生している場合はそれらの生育範囲を用いてシールズ数等の制限値を検証することが望ましいと考えられた。

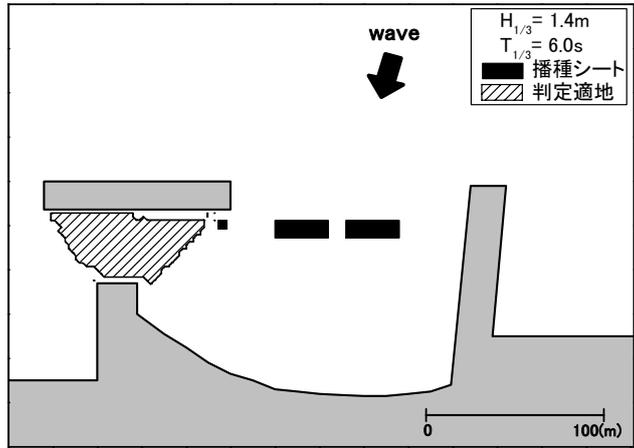


(a) シールズ数<0.2, 地形変化速度<±1cm/hr

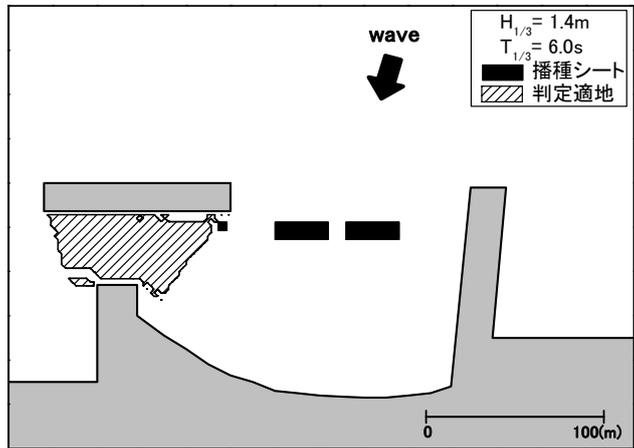


(b) シールズ数<0.5, 地形変化速度<±3cm/hr

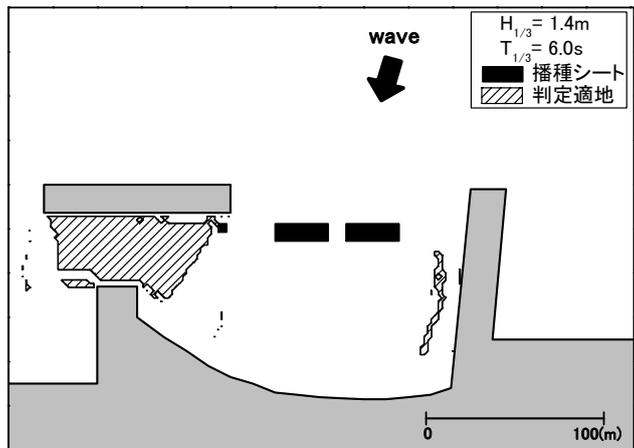
図 4.3.6 アマモに対する適地評価(冬期高波浪)



(a) シールズ数<0.2, 地形変化速度<±1cm/hr



(b) シールズ数<0.5, 地形変化速度<±3cm/hr



(c) シールズ数<0.7, 地形変化速度<±3cm/hr

図 4.3.7 アマモに対する適地評価(冬期最大波)

4.4 まとめ

本章では、効率良くアマモ場造成を実施する為には、アマモ場造成の対象海域の各種条件を予め検討して造成適地を選定する必要があると考え、3次元海浜変形計算法を用いたアマモ場造成適地の評価手法を構築し、アマモ場造成を実施した東播海岸谷八木地区に適用して検証した結果について述べた。主要な結論は以下の通りである。

- (1) エネルギー平衡方程式による平面波浪場計算，ラディエーション応力を外力とする運動方程式と連続式による海浜流計算，局所漂砂量モデルと漂砂の連続式による地形変化計算の3モデルからなる3次元海浜変形計算法を構築した。
- (2) アマモが存在し得るか否かの判定指標には，根の張り具合に応じ，アマモの成長速度に比較して短時間に発生する侵食量が直接のアマモの株の流出につながるとして地形変化速度を，加えて，正味の漂砂量が小さくてもシートフロー状に激しく底質が移動を繰り返せばアマモの流失につながると考え，底質の移動形態における各状態の遷移条件を表すシールズ数を併用した。
- (3) 評価の対象とした波浪条件は，播種シートのすぐ沖側で計測した現地波浪観測結果に基づき，冬期の最大波程度として $H_{1/3}=1.4\text{m}$ ， $T_{1/3}=6.0\text{s}$ ，波向き SW を，また播種シート敷設後のアマモ株の減耗に影響したと考えられた $H_{1/3}=0.8\text{m}$ ， $T_{1/3}=5.0\text{s}$ ，波向き SW を比較的良好に来襲する冬期高波浪として対象とした。
- (4) 波浪場計算の結果，離岸堤背後に敷設した $5\text{m}\times 5\text{m}$ の播種シートの位置での有義波高は，冬期最大波および冬期に比較的良好に来襲する高波浪(冬期高波浪)に対して，ともに $0.2\sim 0.4\text{m}$ 程度であった。
- (5) 海浜流計算の結果，2つの突堤に挟まれた海浜の汀線付近の水深が 3m 以浅の領域で，東側の突堤に向かう沿岸流が計算された。この沿岸流は，宇多(1997)が指摘した当海岸の沿岸漂砂の方向と一致した。
- (6) シールズ数の算定結果から，当該海域でアマモが多く自生している離岸堤背後の領域におけるシールズ数は，来襲波浪によらず 0.2 以下であったことから，この海域ではシールズ数が常に 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た。
- (7) アマモの発芽・生育数が順調に増加した $5\text{m}\times 5\text{m}$ の播種シートを敷設した離岸堤端部背面でのシールズ数は来襲波浪によらず 0.5 前後であるのに対し，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シールズ数は 0.8 から 2 程度とかなり大きかった。
- (8) 地形変化計算の結果，アマモが多く自生している離岸堤背後の地形は安定していた。
- (9) 地形変化計算の結果，離岸堤端部背後の $5\text{m}\times 5\text{m}$ の播種シート敷設位置は侵食域であり，アマモが自生していなかった理由の一つと考えられた。この領域でアマモが群落を形成したことは，播種シートが地形変化に対する環境緩和策として有効であることを示

した.

- (10)アマモの生長に必要な光を左右する水深とシールズ数および地形変化速度を評価項目として当海岸を評価したところ, この海域のアマモの自生範囲は, 波浪条件に関わらず, 水深を 2~3m(潮位を含まず), シールズ数 0.2 以下, 地形変化速度 1cm/hr 以下の条件で推定可能と考えられた.
- (11)この東播海岸においては, 播種シートのアマモの生育に対する環境緩和効果を加味して, 播種シートの敷設適地すなわち播種シートによるアマモ場造成適地は, 水深を 2~3m(潮位を含まず), シールズ数 0.5 ないし 0.7 以下, 地形変化速度 3cm/hr 以下の条件を満たす領域であると考えられた.
- (12)他の海域に本評価手法を適用する場合, 東播海岸を対象に得られた条件と似た値が設定可能と予測されるが, 対象海域にアマモ場が自生している場合はそれらの生育範囲を用いてシールズ数等の制限値を検証することが望ましいと考えられた.

参考文献

- 宇多高明(1997)：日本の海岸侵食，山海堂，pp.287-289.
- 有田 守・出口一郎・岩田公司・芳田利春(2007)：地形変化と生息過程を考慮したアマモ場適地選定手法に関する研究，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.1086-1090.
- 有田 守・芝崎拓弥・出口一郎(2008)：アマモ場による波浪減衰効果を考慮した適地選定手法に関する研究，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.786-790.
- 金澤 剛・森 鐘一(2003)：現地アマモ場造成試験と適地評価に関する研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.1266-1270.
- 合田良實(1975)：浅海域における波浪の破碎変形，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 3 号，pp.59-106.
- 合田良實(1991a)：増補改訂 港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説，鹿島出版会，pp.55-59.
- 合田良實(1991b)：増補改訂 港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説，鹿島出版会，pp.32-36.
- 榎木 亨(1986)：漂砂と海岸侵食，森北出版，pp.64-67.
- 島谷 学・中瀬浩太・熊谷隆宏・月館真理雄(2000)：アマモ種子の埋没機構に関する研究，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.1171-1175.
- 島谷 学・中瀬浩太・中山哲巖・太田雅隆・月館真理雄・星野高士・内山雄介・灘岡和夫(2001)：人工リーフ設置による外力場の変化とアマモ分布条件との関係について，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.1156-1160.
- 島谷 学・中瀬浩太・岩本裕之・中山哲巖・月館真理雄・星野高士・内山雄介・灘岡和夫(2002)：興津海岸におけるアマモ分布条件について，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.1161-1165.
- 清水琢三・近藤浩右・渡辺 晃(1990)：局所漂砂量算定式の現地適用性に関する研究，海岸工学論文集，第 37 巻，pp.274-278.
- 鈴木康正・森川高德・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.767，35p.
- 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，港湾技術研究所報告，第 30 巻，第 1 号，pp.21-67.
- 田中 仁・Aung THU(1993)：全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則，土木学会論文集，No.467/II-23，pp.93-102.
- 田中 仁・AHMAD 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.
- 出口一郎・三宅亮志・岩田公司・芳田利春・荒木進歩(2005)：ライフサイクルを考慮したアマモの生息条件に関する研究，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.1011-1015.
- 土木学会海岸工学委員会 研究現況レビュー小委員会(1994)：海岸波動 波・構造物・地盤

- の相互作用の解析法, 土木学会, pp.121-125.
- 中瀬浩太, 田中裕一, 桧山博昭(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, 海岸工学論文集, 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, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.1061-1065.
- 本間 仁・堀川清司(1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp.249-284.
- 丸山康樹・五十嵐由雄・石川祐介(1987): アマモ場適地選定手法 -岸側の砂移動限界-, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.227-231.
- 山木克則・新保裕美・田中昌宏・三富龍一・小河久朗(2006): アマモ場拡大の実態把握と種苗移植による新規群落形成の試み, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.1006-1010.
- 渡辺 晃(1979): 振動流境界層と海浜過程, 第 15 回水工学に関する夏期研修会講義集, B 海岸・港湾コース, 土木学会, pp.B-3-1-B-3-13.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・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 回海講論文集, pp.406-410.

第5章 藻場消失海域におけるアマモ場再生の試み

5.1 概説

アマモ場の再生は、当初はアマモ場消滅に伴う漁獲量減少を背景に漁場整備を目的とし、その後は埋立などに伴うアマモ場消滅の代償処置として、さらに近年では、自然環境の回復や生物の多様性増大を目的として行われるようになった。アマモ場再生事業は、1980年代は瀬戸内海に面した自治体による比較的小規模な再生事例が多く、1990年代は埋立等に伴う代償処置として事前の環境調査に基づいた阻害条件の緩和や改善策を講じた上で大規模再生事業が実施され、2000年代になると、経済活動の低迷などもあって大規模なアマモ場再生事業は少なくなる中、市民レベルでの自然環境保全意識が高まり、行政、漁協やNPO、市民など多様な主体の協働作業によるアマモ場再生活動が活発に行われるようになったとされている(水産庁・(社)マリノフォーラム 21, 2007a)。また、アマモ類の自然再生ガイドブック・巻末資料(水産庁・(社)マリノフォーラム 21, 2007b)には、国内における代表的なアマモ場再生事例がまとめられているが、その多くは部分的なアマモ場の消失があっても、いまだ現存するアマモ場に隣接して実施されているようであり、かつては繁茂していたアマモ場が衰退してしまった海域でのアマモ場再生の成功例の報告は少ないようである。

ところで、大阪湾の南東部に位置するりんくうタウン海域もかつては広くアマモ場に被われていたが、現在では沿岸の開発などによりほとんど消失してしまっている。地元漁業者の間では、それと時期を同じくして水産資源が減少したとの声があり、当海域でのアマモ場の再生が望まれていた。

こうした背景のもと、りんくうタウン海域の北中通、泉佐野、田尻、岡田浦、樽井の5つの漁業協同組合を主体とした協働グループにより現地アマモ場再生試験が実施されている。ここでは、このアマモ場再生試験の実施に際し、前章までに記した造成適地の評価手法を適用して実施海域を選定し、その上で播種シート工法を適用してアマモ場消失海域でのアマモ場再生の可否を検証した結果(金澤ら, 2005)を記すものである。同時に、適用した造成工法および適地評価手法のアマモ場の衰退海域における有効性について記す。さらに、従来アマモ場が存在しなかった海域でのアマモ場創出の試みとして、港湾域に新設された人工干潟の浅海部でアマモ場造成を試みた結果を記す。

5.2 りんくうタウン海域でのアマモ場再生

5.2.1 試験海域の概要

りんくうタウン海域における本アマモ場再生試験は、アマモ場の衰退海域において造成によるアマモ場の再生を実証することを主目的とし、アマモの生育に適した海域を選定した上で小規模ながらも複数地点でアマモ場造成を実施したものである。

試験対象海域は図 5.2.1 に示したように大阪湾の南東部に位置するりんくうタウン海域の田尻町田尻漁港から泉南市樽井海岸に至る範囲とした。この海域におけるアマモ場の分布について、地元漁業協同組合から、以前は現在の海岸線よりも内陸側にアマモ場が存在したが、1980年代半ばの埋立てにより消滅したとのヒアリング結果を得た(写真 5.2.1)。また、それ以前にも水質の悪化とともにアマモが減少したとの談話もあったことから、当海域においては、比較的水深が深いところに生育していたアマモは水質の悪化にともなう透明度の低下による光の不足、水深が浅いところに残ったアマモは浅場の埋立が衰退の原因であると考えられた。

試験対象海域の中から、この海域の水深や底質などのアマモの生育環境を考慮のうえ、海域利用状況に関する地元漁業協同組合へのヒアリングと協議により、図 5.2.2 に示した①泉南市樽井サザンビーチの東側、②田尻町田尻漁港南西側の人工海浜前面の2海域を候補地として選出した。このうち、樽井サザンビーチの東側は北西に面した人工海浜であり、海岸の西側にある北向きの突堤および泊地の突堤によって比較的高波浪が生じる南西寄りの波に対しては遮蔽効果が期待できる海岸である。一方、田尻漁港南西側の人工海浜前面は広く北西に面しており、沖の正面には関西国際空港が位置するが南西寄りの波に対する遮蔽効果は期待できない海岸である。なお、事前および追跡調査時に調査した範囲では、両海域とも自生のアマモは確認されていない。

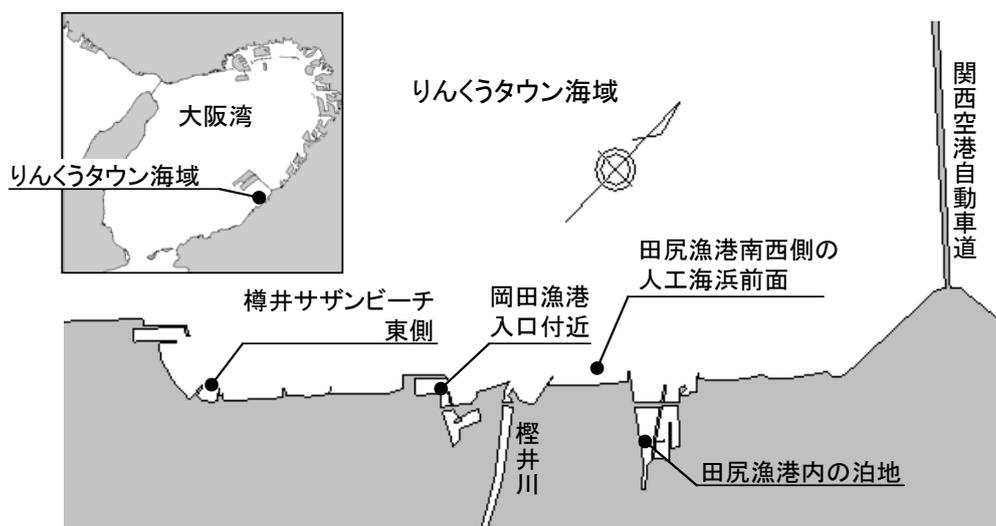
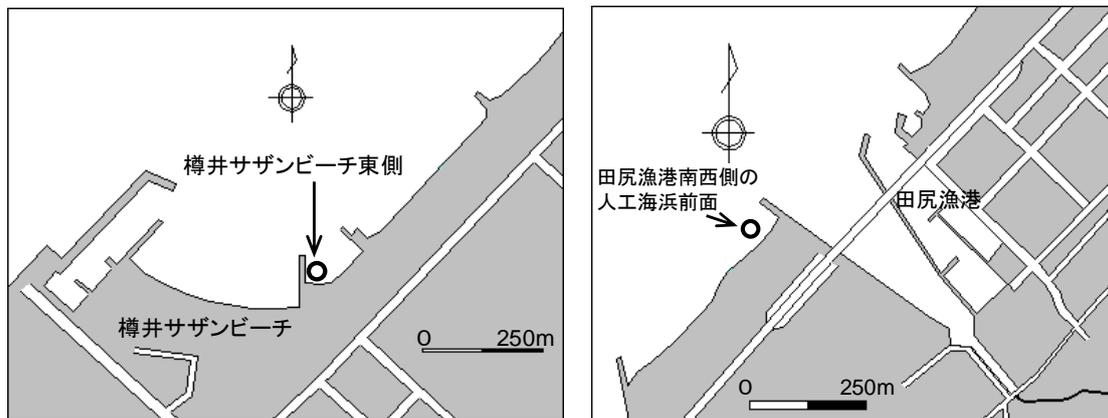


図 5.2.1 アマモ場再生試験実施海域



写真 5.2.1 リんくう海域の消滅したアマモ場
(漁業協同組合へのヒアリング結果より作成)



(a) 樽井サザンビーチ東側

(b) 田尻漁港南西側人工海浜前面

図 5.2.2 試験候補地詳細位置

5.2.2 試験海域の事前評価

(1) 数値計算による適地評価

りんくう海域におけるアマモ場再生試験の現地実施に先立ち、第4章で記した3次元海浜変形計算を用いたアマモ場の造成適地評価手法を、このアマモ場再生試験実施候補地である樽井サザンビーチの東側および田尻漁港南西側の人工海浜前面の2海域に適用して、試験実施の可否について検討した。なお、こうした3次元海浜変形計算を用いたアマモ場の造成適地評価手法は各種が提案され、現地のアマモ場に適用されてその有用性が検証されている(例えば、中瀬ら(1992)、中瀬・田中(1993)、島谷ら(2001, 2002)、出口ら(2005)、有田ら(2007, 2008))。しかしながら、こうした適地評価を踏まえてアマモ場造成を実施した例はあまり報告されていないようである。

アマモ場造成にあたって、数値計算による適地評価を実施した事例としては、岩国飛行場滑走路移設に関連する事例(環境省, 2004)がある。ここでは、滑走路移設のための213haの埋立に伴う藻場の消失に対し、学識経験者で構成される委員会が1996年に設置され、消滅する藻場・干潟の適切な回復を図るための検討が行われた。その中では、既往資料調査、現地調査とともに数値シミュレーションによる地形変化予測が行われ、アマモ場を含む藻場・干潟の形成可能環境条件が検討されて藻場・干潟候補地区の絞込みと回復案が示されている。また、山本ら(2004)は広島県三原市地先における1997年～2001年度のアマモ移植では、事前に物理環境調査と潮流シミュレーションを実施し、適地評価を行った上で移植を実施したと報告している。このようにアマモ場造成において事前の数値計算による適地評価がなされた事例が少ないのは、2000年代に入って経済活動の低迷などもあって大規模なアマモ場再生事業は少なくなる中、市民レベルでの自然環境保全意識が高まり、行政、漁協やNPO、市民など多様な主体の協働作業によるアマモ場再生活動が活発に行われるようになったとされており(水産庁・(社)マリノフォーラム21)、活動の規模が比較的小さくなったことが一因と考えられる。

このような状況の中、過去には存在していたアマモ場が消滅した海域で新たにアマモ場を再生しようとする試みの中で、数値計算によって試験候補地を事前に評価することは極めて貴重な事例を与えるものである。なお、適用する適地評価手法は、第4章で示した水深と3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シールズ数でアマモ場の生育適地を評価して、その分布と範囲を検討するものである。3次元海浜変形計算における平面波浪場の計算には、高山ら(1991)の砕波を考慮したエネルギー平衡方程式を使用し、海浜流場の計算には平面波浪場の計算結果からラディエーション応力を外力として、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)の方法を用いた。また、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、シールズ数は田中・SANAの方法(1996)で求めた波・流れ共存場での摩擦係数を用いて評価するものである。

(2) 計算条件

検討対象波浪は第 4 章に示した明石市東播海岸での検討事例を参考に、年最大波クラスの激浪時と、波による地形変化に対してより脆弱なアマモの幼体期に作用する冬期の比較的頻繁に来襲する波浪を対象とすることとした。しかしながら、近接地点での波浪条件が入手できなかったため、全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS, 国土交通省港湾局監修, (財)沿岸技術研究センター)の 1993 年から 2002 年の神戸港のデータから設定した。すなわち、激浪時諸元として有義波の年間最大値の 10 年間における平均値、および冬期波浪時諸元として 10 年間の 1 月, 2 月, 12 月の有義波の各月の最大値を平均したものをそれぞれの代表値として設定した(表 5.2.1)。波向は地元漁業協同組合へのヒアリングの結果も踏まえて、吹送距離が長くなる WSW とした。対象波浪諸元一覧を表 5.2.2 に示す。

計算に使用した海底地形データは海図ならびに検討に先立ち実施した深浅測量結果を使用した。平面波浪変形計算は、神戸港の波浪データが水深 17m での観測値であること、使用した地形データと水深データの疎密さから再現できる計算領域データの精度を勘案して、水深 20m 程度から水深 6m 程度までの広領域と、水深 6m 程度以浅の 2 段階に分けて実施した。図 5.2.3 に広領域の計算領域図を、図 5.2.4 に計算で使用した広領域の水深分布図とアマモ場再生試験候補地近傍の水深分布図(平均潮位+1.0m を考慮)を示す。

表 5.2.1 神戸港の波浪観測結果(NOWPHAS ; 月最大有義波)

月最大有義波	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	最大値
1993年 $H_{1/3}$ (m)	-	-	-	1.39	0.78	1.20	1.58	1.70	3.77	1.01	0.90	1.49	3.77
$T_{1/3}$ (s)	-	-	-	4.5	3.8	6.0	5.0	4.9	7.3	4.0	4.0	4.9	7.3
1994年 $H_{1/3}$ (m)	1.51	1.61	1.32	2.32	1.45	1.25	0.89	1.21	1.41	2.09	0.75	1.25	2.32
$T_{1/3}$ (s)	4.9	4.9	4.3	6.4	4.7	4.5	4.0	4.5	4.6	5.6	3.4	4.2	6.4
1995年 $H_{1/3}$ (m)	1.13	0.77	1.34	2.22	1.06	1.57	1.92	1.22	1.66	0.70	1.37	1.22	2.22
$T_{1/3}$ (s)	4.3	3.9	4.3	5.7	3.8	4.7	5.3	4.3	5.2	3.7	4.7	4.4	5.7
1996年 $H_{1/3}$ (m)	1.24	0.94	1.74	1.07	0.76	1.96	1.88	3.48	0.73	1.11	0.88	1.68	3.48
$T_{1/3}$ (s)	4.6	3.6	5.4	4.1	3.8	5.3	5.0	7.1	3.8	4.4	3.6	5.6	7.1
1997年 $H_{1/3}$ (m)	1.70	1.21	0.88	0.74	2.02	0.90	-	-	1.44	1.09	2.21	1.39	2.21
$T_{1/3}$ (s)	5.1	4.3	4.1	3.7	5.3	3.4	-	-	4.4	4.2	6.0	4.5	6.0
1998年 $H_{1/3}$ (m)	0.94	1.77	2.36	1.09	1.86	2.21	0.88	1.03	1.59	3.11	1.03	0.92	3.11
$T_{1/3}$ (s)	3.7	4.9	5.8	4.5	5.2	5.5	4.0	4.3	5.2	7.6	4.1	3.8	7.6
1999年 $H_{1/3}$ (m)	1.30	1.12	0.88	1.65	1.85	1.68	1.18	1.14	2.97	1.08	1.05	1.00	2.97
$T_{1/3}$ (s)	4.6	4.2	5.1	5.0	4.9	5.1	4.4	4.4	6.6	4.2	5.2	4.2	6.6
2000年 $H_{1/3}$ (m)	0.96	1.67	1.18	0.67	0.76	1.46	1.52	1.13	1.09	0.84	1.52	1.36	1.67
$T_{1/3}$ (s)	4.2	4.8	4.1	3.3	3.8	4.9	4.5	4.5	4.4	4.0	4.7	4.4	4.9
2001年 $H_{1/3}$ (m)	0.97	1.05	1.38	1.10	0.68	1.22	0.99	1.12	0.44	1.26	0.78	1.12	1.38
$T_{1/3}$ (s)	4.0	4.1	4.4	4.2	3.4	4.4	3.9	3.9	2.9	4.8	4.1	4.4	4.8
2002年 $H_{1/3}$ (m)	1.57	0.92	0.54	1.03	0.88	0.88	1.27	1.10	1.28	1.33	1.10	1.07	1.57
$T_{1/3}$ (s)	4.8	3.9	4.1	4.4	3.7	4.1	4.5	4.1	4.6	4.6	4.0	4.1	4.8
平均値 $H_{1/3}$ (m)	1.26	1.23											1.25
$T_{1/3}$ (s)	4.5	4.3											4.5

表 5.2.2 検討対象波浪諸元一覧

	激浪時	冬期波浪
有義波高 $H_{1/3}$ (m)	2.5	1.3
有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	6.1	4.4
波 向	WSW	WSW

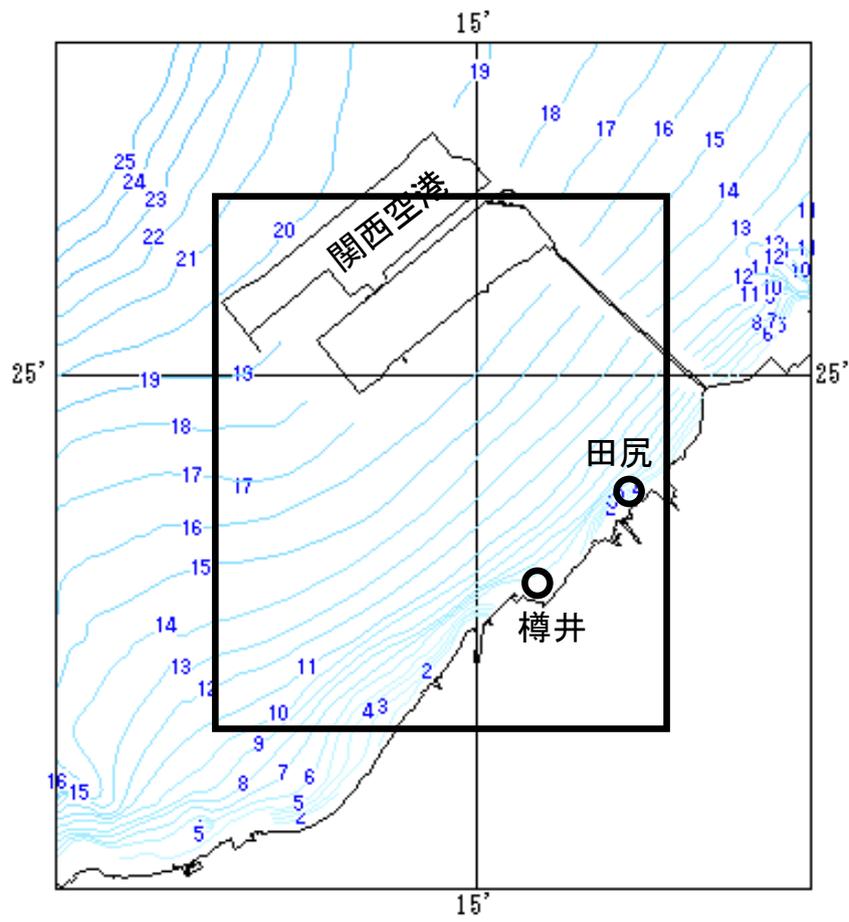
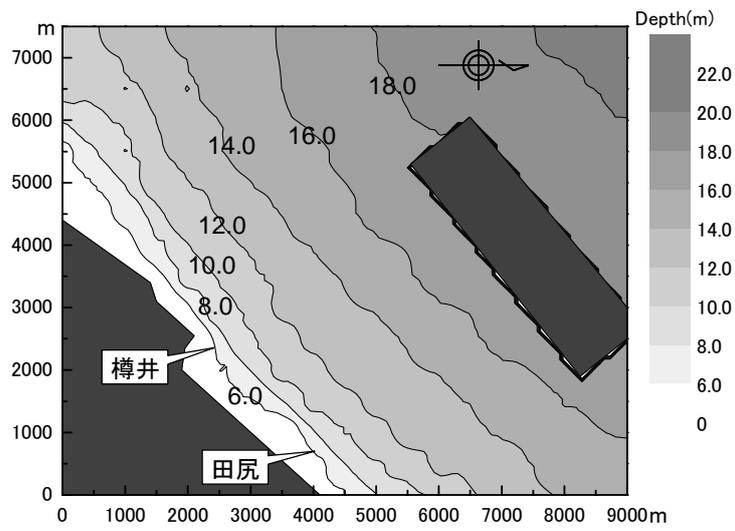
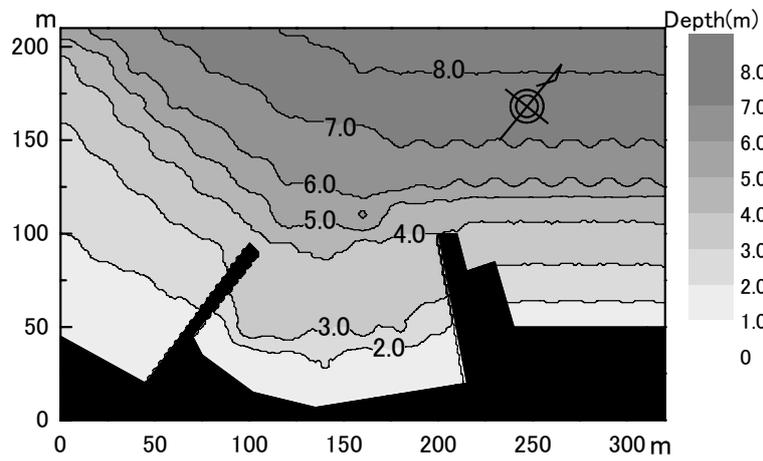


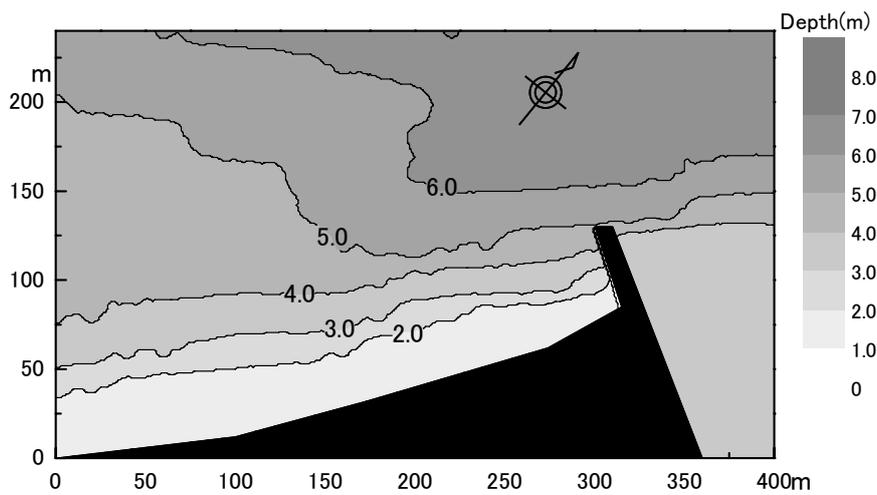
图 5.2.3 計算対象領域図(広領域)



(a) 広領域



(b) 樽井サザンビーチ東側

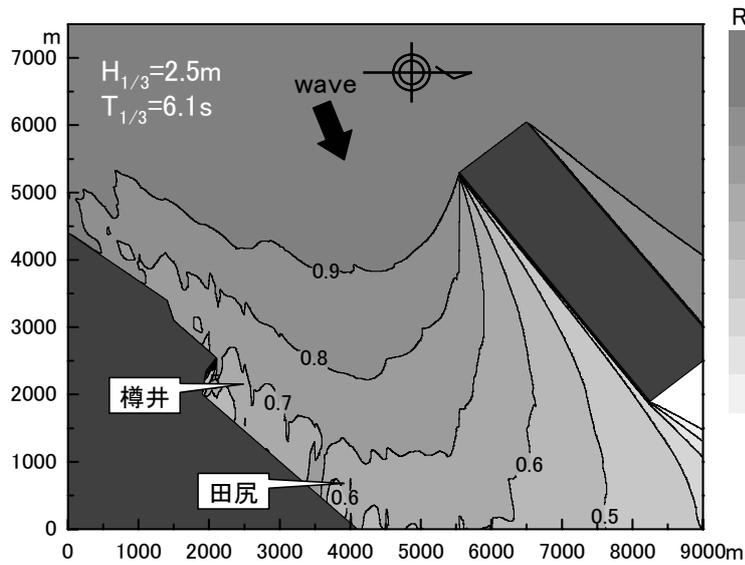


(c) 田尻漁港南西側人工海浜前面

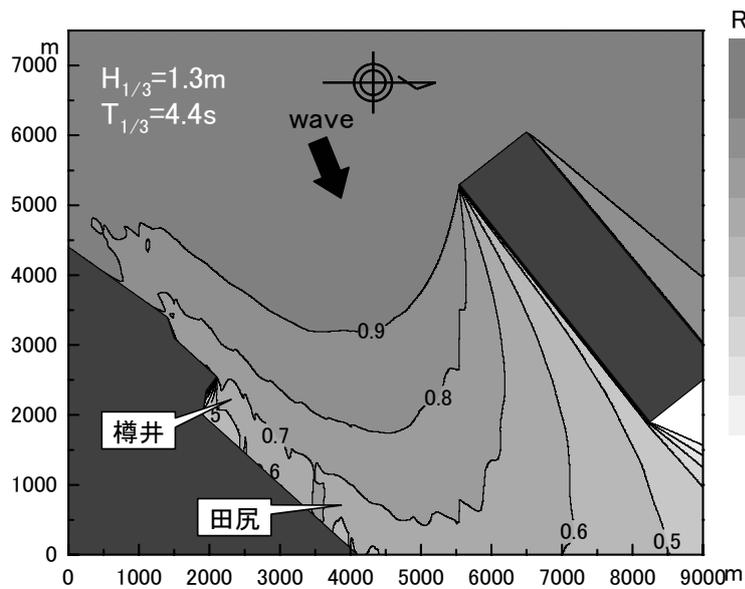
図 5.2.4 計算対象領域の水深分布図

(3) 計算結果

水深 20m 程度から水深 6m 程度までの広領域の計算結果の一例として、**図 5.2.5** に激浪時および冬期波浪時それぞれの入射波高で除した波高比 R_H の分布を示す。アマモ場再生試験候補地である樽井サザンビーチおよび田尻漁港付近の波高比 R_H は激浪時および冬期波浪時ともに、沖の関西国際空港と海岸の影響により回折波領域に含まれることがわかる。こうした計算結果から、樽井サザンビーチ沖および田尻漁港沖の水深 6m 付近で、代表的な有義波高と波向きを抽出した。その結果を表 5.2.3 に示す。



(a) 激浪時



(b) 冬期波浪

図 5.2.5 波高比分布(広領域)

表 5.2.3 水深 6m 付近における代表波浪諸元一覧

	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	波向
樽井サザンビーチ沖：激浪時	1.65	6.1	W14.8° N
樽井サザンビーチ沖：冬期波浪	0.89	4.4	W4.7° N
田尻漁港南西側沖：激浪時	1.58	6.1	W4.4° N
田尻漁港南西側沖：冬期波浪	0.86	4.4	W4.2° S

表 5.2.3 に示した波浪諸元を入射波として、図 5.2.4 (b) および (c) に示した樽井サザンビーチ東側と田尻漁港南西側の人工海浜前面を対象とした 3 次元海浜変形計算を実施した。なお、各地点の底質の中央粒径は、事前の調査結果から樽井サザンビーチ東側が 0.4mm、田尻漁港南西側の人工海浜前面が 0.2mm とした。それぞれの検討対象地点に対して、激浪時および冬期波浪の計算結果として有義波高分布、シールズ数分布および地形変化速度の分布図を図 5.2.6 および図 5.2.7 に示す。

樽井サザンビーチ東側を対象とした図 5.2.6 によれば、対象波浪によらず図中左側(西側)の突堤の遮蔽域で有義波高がかなり小さくなり、この突堤の高波浪に対する遮蔽機能が高いことが認められた。これに伴い、シールズ数の分布においても冬期波浪の場合には、この突堤の東側背後の比較的広い範囲でシールズ数が 0.2 以下の領域が広がっている。一方、激浪時でもこの突堤の東側背後のごく近傍ではあるが、シールズ数が 0.2 以下の領域が計算された。第 4 章で記したように、本 3 次元地形変化モデルを用いて明石市東播海岸谷八木地区地先のアマモ場について検討した結果、自生のアマモ場は波浪条件に関わらず常にシールズ数が 0.2 以下の領域に存在していた。したがって、これをこの樽井サザンビーチ東側の海域に当てはめれば、この突堤の東側背後近傍で播種をしてアマモの種子が留まれば、冬期の高波浪が来襲しても発芽・生育し、アマモの繁茂期あるいは衰退期となる夏あるいは秋期の激浪時においても地下茎と根を張ったアマモは流失せずに群落を維持し続ける可能性があるかと推測された。また、地形変化速度分布においても、冬期波浪の場合はこのビーチ西側の突堤の東側背後に地形変化速度が±1cm/hr 以下の比較的安定した領域が広がり、さらにアマモ場造成による群落定着の期待が高まった。ただし激浪時の地形変化速度はやや大きく、特に突堤の中程より先端方向では侵食傾向にあるため、アマモ場造成の実施には注意が必要であると考えられた。

一方、田尻漁港南西側の人工海浜前面を対象とした図 5.2.7 によれば、樽井サザンビーチ東側のように遮蔽域を作る突堤のような構造物がないため、汀線近くでも有義波高は激浪時には 0.8m 程度、冬期波浪時でも 0.7m 程度あって、かなり大きい。それに伴いシールズ数は、激浪時には領域全体に大きな値で分布し、アマモの自生が期待されるシールズ数 0.2 以下の領域は存在せず、冬期波浪時でも水深が 2m 程度の等深線付近に狭く帯状にシー

ルズ数が比較的小さい領域が分布していると計算された。したがって、冬期波浪時に比較的シールド数が小さい領域に、ある時期、アマモが生育したとしても、夏や秋期の台風などの激浪によってアマモが流失することが示唆された。

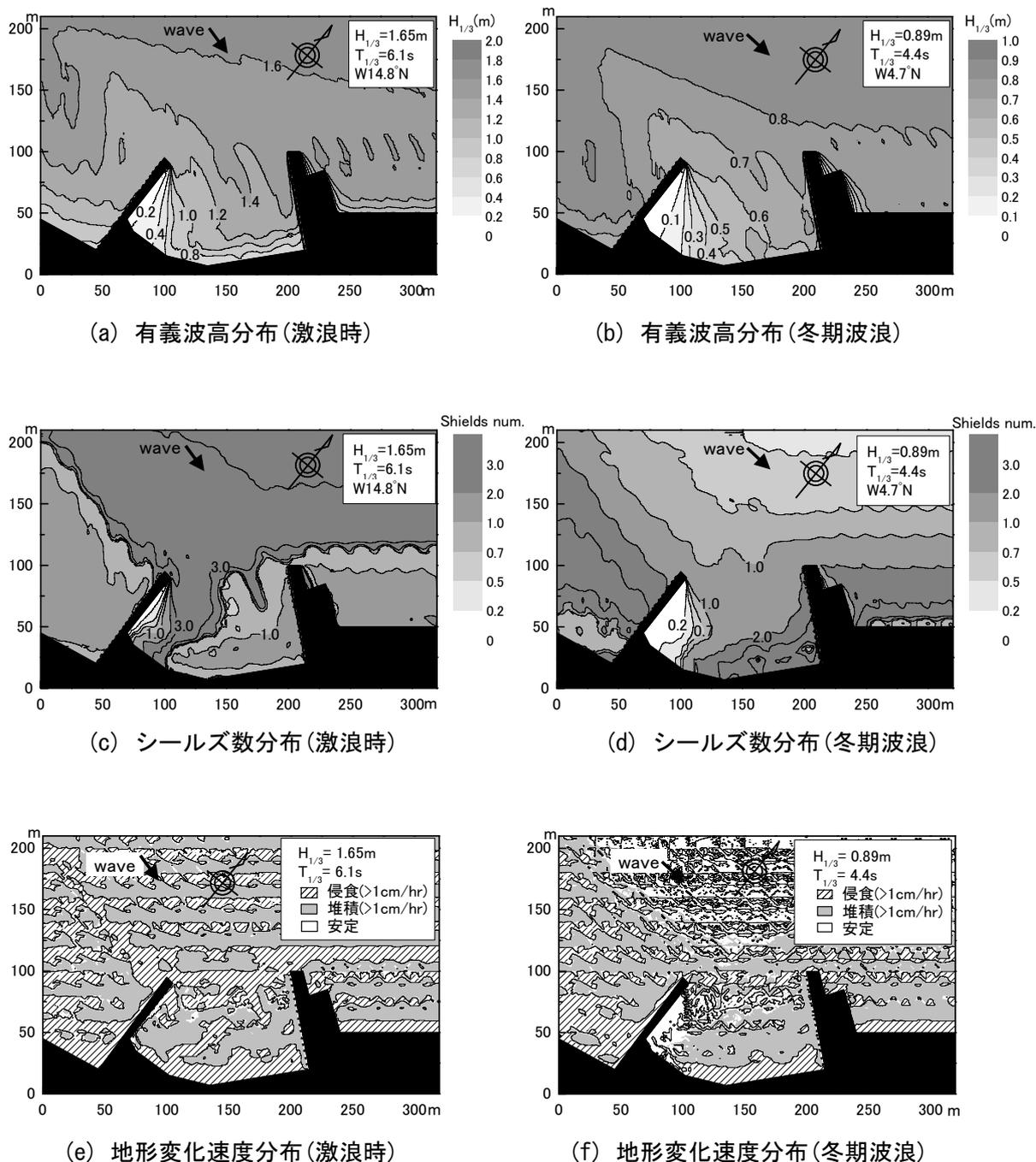
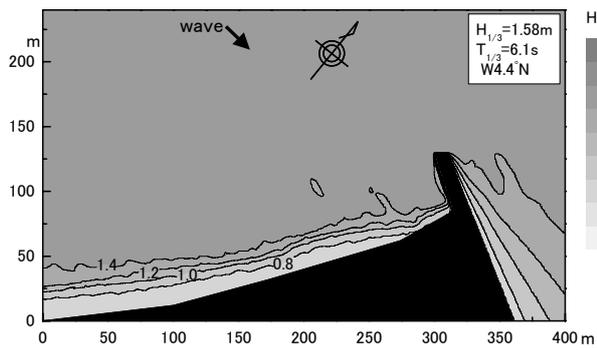
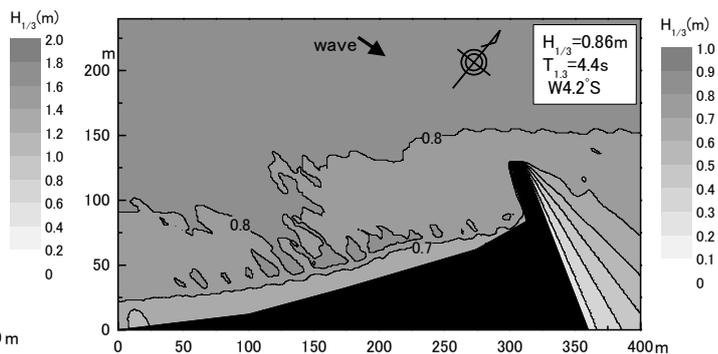


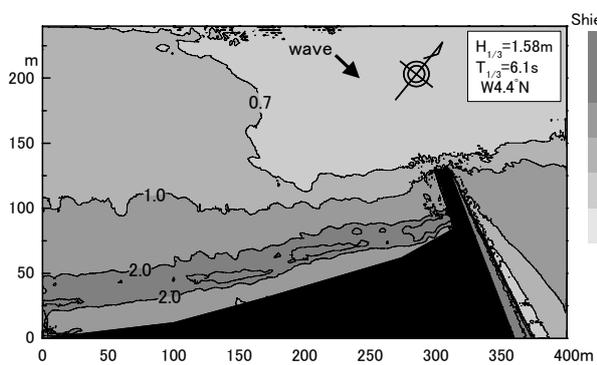
図 5. 2. 6 計算結果(樽井サザンビーチ東側)



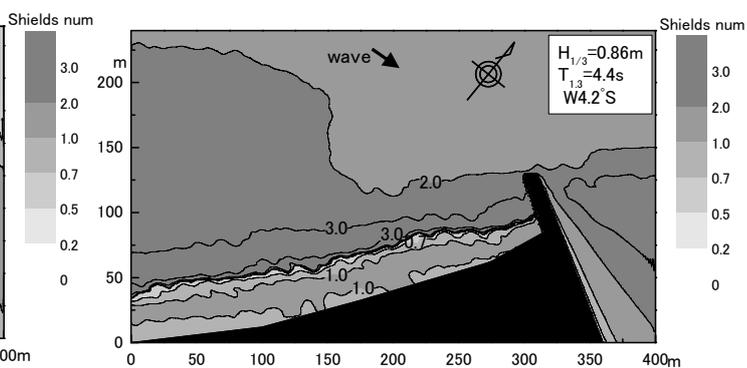
(a) 有義波高分布(激浪時)



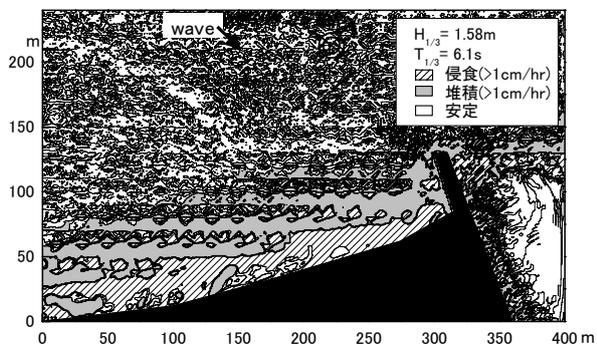
(b) 有義波高分布(冬期波浪)



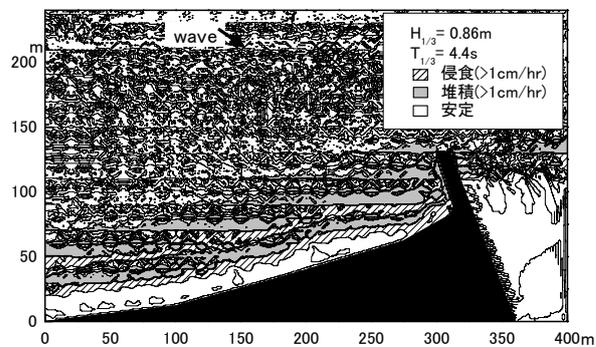
(c) シールドズ数分布(激浪時)



(d) シールドズ数分布(冬期波浪)



(e) 地形変化速度分布(激浪時)



(f) 地形変化速度分布(冬期波浪)

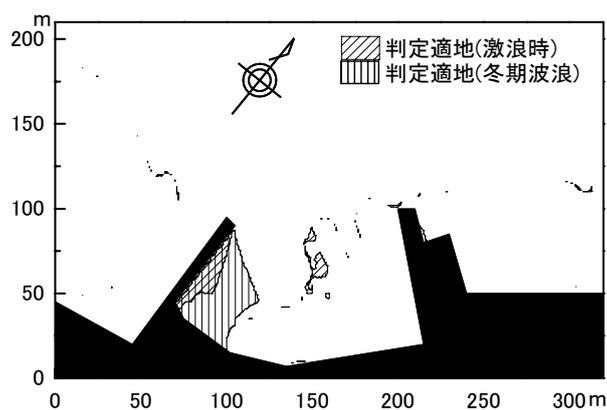
図 5. 2. 7 計算結果(田尻漁港南西側の人工海浜前)

(4) 適地判定

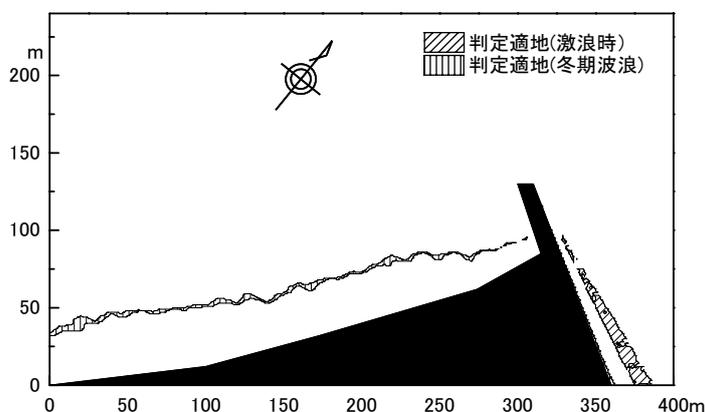
検討対象の 2 海域にはアマモが自生していないことから、現地海域でアマモが存在するためのシールズ数等の計算結果に対する判定基準値が明確には設定できない。そこで、第 4 章で記したように、本 3 次元地形変化モデルを用いて明石市東播海岸谷八木地区地先のアマモ場造成試験結果について検討した結果を参考に、判定基準を以下のように設定した。

- ①水深：5m 以浅（潮位+1m を含む）
- ②シールズ数：0.7 以下
- ③地形変化量：3.0cm/h 以下

判定した適地の分布を示したものが図 5.2.8 である。図中には激浪時に対してアマモの生育に適したと判断した領域と冬期波浪に対して判定した適地を重ねて示してある。樽井サザンビーチの東側では図中左側の突堤付近に激浪時と冬期波浪時の適地が重なって分布しており、この領域ではアマモが生育し永続的に群落を維持できる可能性が高く、アマモ場造成にとって有望であると判断された。一方、田尻漁港南西側の人工海浜前面は、冬期波浪時には適地があるものの、激浪時には対象海域に適地が存在しないことから、アマモ場造成にとっては厳しい海域であると判断された。



(a) 樽井サザンビーチ東側



(b) 田尻漁港南西側の人工海浜前

図 5.2.8 計算結果から評価した造成適地の分布

5.2.3 アマモ場再生試験

(1) 実施海域とアマモ場造成方法

アマモ場再生試験の実施地点は、事前評価の結果を踏まえ、アマモ場の永続的な存続が期待できると判断した樽井サザンビーチの東側の海域とした。また、水深データが入手できなかったことから数値計算による事前評価は実施しなかったが、地元漁業協同組合の意向を踏まえて岡田漁港入口付近の浅場および田尻漁港内の泊地の2地点を加えた(図 5.2.1)。アマモ場再生試験の実施時に計測した各地点の水深と底質粒度組成および底質の中央粒径を表 5.2.4 に示した。これによると、岡田漁港入口付近の実施地点は水深がやや浅く、樽井サザンビーチの東側は底質に含まれる泥分が少なく中央粒径がやや大きいのが特徴的であった。

アマモ場造成工法は第3章で記した播種法の一つである播種シートによるアマモ場造成法を用いた。なお、播種法においては、使用する種子の健全性を事前の室内発芽試験で確認するが、実際に播種した種子が発芽するか否かは播種後の現地追跡調査で確認せざるを得ない。そこで、今回のアマモ場再生試験では室内発芽試験と同様に予め室内の水槽で発芽させ育苗したアマモの幼苗の移植も実施し、確実な現地試験の実施を期した。

表 5.2.4 試験実施地点の状況

		樽井サザン ビーチ	岡田漁港 入口	田尻漁港内 泊地
水深(D.L.)		-1.10m	-0.70m	-1.60m
底 質	砂泥分	73.40%	98.20%	92.80%
	泥分	1.90%	3.60%	13.40%
	中央粒径	0.32mm	0.19mm	0.18mm

(2) 幼苗生産・移植と播種シートの製作・設置

今回のりんくうタウン海域におけるアマモ場再生試験で使用したアマモ種子は、2003年6月に姫路市白浜海水浴場前で採取したものを使用した。アマモ場造成では遺伝的な攪乱を防ぐ配慮が求められている(環境省, 2004)が、大阪湾の恒流(藤原ら, 1989; 中辻・藤原, 1995)を考慮して対象海域へのアマモ種子の供給経路を考えると、明石海峡を通過して時計回りに大阪湾岸に沿った経路が考えられた。したがって、このアマモ種子の当海域での使用は許容されると考えた。なお、本アマモ場再生試験実施後に発刊されたアマモ類の自然再生ガイドブック(水産庁・(社)マリノフォーラム 21, 2007)では、アマモの遺伝的多様性を基に設定された種苗の移動禁止ラインが示されているが、このりんくうタウン海域におけるアマモ場再生試験で使用したアマモ種子の採取海域と移植および播種を実施した海域は、このラインを跨いではない。

2003年6月に姫路市白浜海水浴場前で採取したアマモ種子は、第3章に記した屋外水槽での追熟養生とその後の室内での低温保存を経て、2003年9月に園芸用の川砂を入れた市販の天然素材ポット(直径約6cm)48個に、1ポットあたり20粒ずつを約1cmの深さに播かれた。そして天然素材ポットごと室内の定温庫内に置かれた人工海水を満たしたガラス水槽内に入れられ、静置された(写真5.2.1)。定温庫は4側面がガラス張りで窓からの間接光が入るもので、庫内温度はアマモの発芽に適するとされる14℃とした。ガラス水槽は海水の蒸発を防ぐため、上部をラップフィルムで密閉した。その後、特に異常が見られない限りガラス水槽およびその中の天然素材ポットは放置された。アマモの幼苗は移植時には1ポット当たり数本から10本程度が発芽生育して、葉長は5cm程度まで伸びていた(写真5.2.2)。

一方、播種シートは1枚の大きさが2m×2mと比較的小さいもので、敷設する前日に泉南市岡田漁港で製作した。この2m×2mという大きさは、明石市東播海岸で使用した30m×10mあるいは5m×5mと異なって十分に人力で運搬が可能な重さであり、この後各地で行われた比較的小規模な試験的な造成では良く使用されるサイズとなった。製作手順を図5.2.9に示す。

播種シートの敷設および幼苗の移植は2003年12月に実施した。播種シートはロールにしたものを船上から人力でダイバーに渡した。また、幼苗の移植ポットは所定個数を籠に入れ、船上からダイバーに渡した(写真5.2.3)が、その途中あるいはダイバーが海底に移動する間に籠の中のポットが倒れてアマモ苗が流失した事例もあり、より確実な作業方法の確立が求められた。それぞれの敷設枚数および移植ポット数を表5.2.5に示した。同一海域に敷設した播種シートは互いに隣接して並べて、移植ポットは播種シートの横に数10cmの間隔でポットごと埋設した。なお、移植ポット総数が用意した48個と異なるのは、発芽生育が思わしくなかったものを除外したことと、上述した作業中にアマモ苗が失われたことによる。また、今回の播種シートおよび幼苗育成に使用したアマモの種子の室内発芽試験における発芽率は約70%であった。

表 5.2.5 敷設シート数および移植ポット数

	敷設シート数	移植ポット数
樽井サザンビーチ	3枚(計12m ²)	14
岡田漁港入口	3枚(計12m ²)	12
田尻漁港内泊地	2枚(計8m ²)	6



写真 5. 2. 1 アマモ種苗生産開始状況(種子の上に砂を被せる前)



写真 5. 2. 2 移植前のアマモ種苗の状況

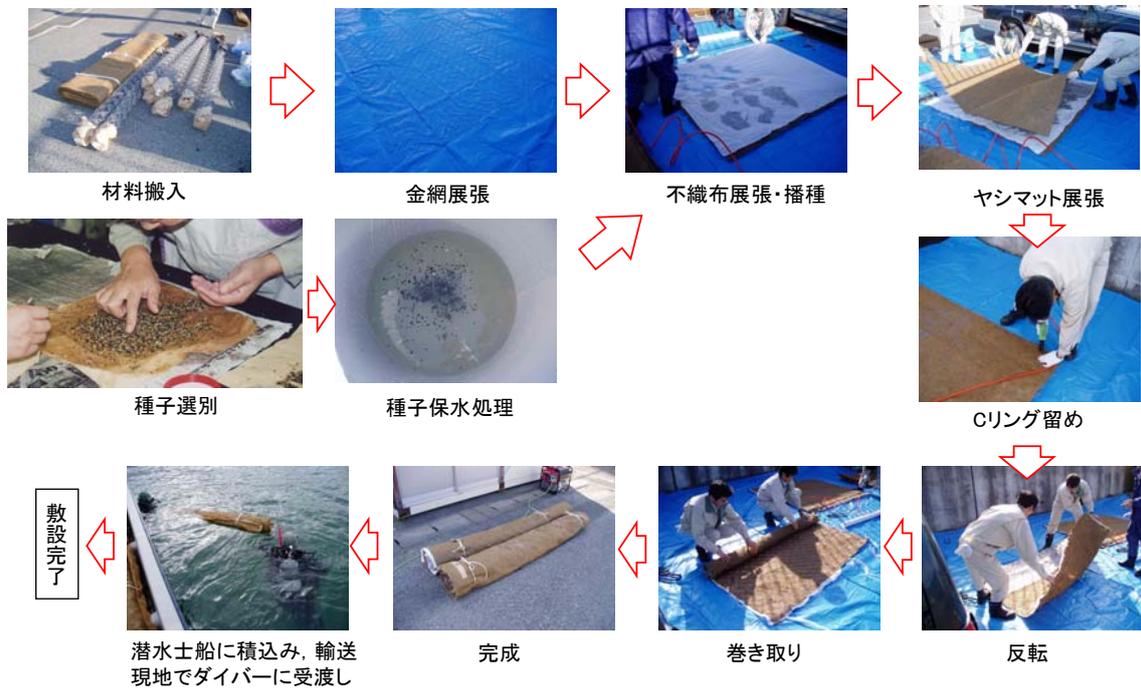


図 5.2.9 播種シート製作手順



写真 5.2.3 移植ポットのダイバーへの受け渡し状況

(3) 追跡調査の結果

播種シート敷設後約2ヶ月の2004年2月、同5ヵ月後の2004年5月、同11ヵ月後の2004年11月、同15ヵ月後の2005年3月および同17ヵ月後の2005年5月に追跡調査を実施した。その後も年に数度の追跡調査を継続しているが、ここでは上記4回に加え、播種シート敷設後約5年5ヶ月が経過した2009年5月の各追跡調査時に計測した各播種シート上でのアマモの発芽生育数を表5.2.6に、幼苗移植ポットからの生育数を表5.2.7に示した。なお、移植ポットからの生育数調査は2004年の3回のみ実施した。それぞれの表中には代表的な葉の長さも示した。また、生育したアマモの一例として、2004年11月の樽井サザンビーチの東側の状況を写真5.2.4に示した。播種シートからの発芽生育状況は、発芽初期である2004年2月の時点では泊地という非常に静穏な海域である田尻漁港内が最も発芽生育数が多い。それに対し、岡田漁港入口付近では発芽生育数がかなり少ないが、これは調査時にシートや移植ポットの洗掘や埋没が確認されたことから波・流れの影響が強いことが原因であったと考えられる。生長期に入った2004年5月の時点では、樽井サザンビーチの東側で急激な生長が見られ、単位面積当たり80本に達した。これは第3章に示した東播海岸のアマモ場造成事例(表3.6.1)における同時期の値に比較して格段に大きな値であり、この試験実施場所がアマモの生長に良く適していたものと考えられた。この樽井サザンビーチの東側で形成されたアマモ群落は、多くの台風が来襲した2004年の夏期および秋期を乗り越え、シート敷設後ほぼ1年になる2004年11月の時点でも十分な生育数を維持し、その後も順調に生育密度を増やした(表5.2.6)。さらに、2005年5月の調査時には種子も確認でき、それ以後の種子による生育範囲の拡大も期待された。そして、播種シート敷設後5年以上が経過した2009年5月では、このアマモ場は播種シート敷設箇所を中心に安定した群落を形成し、かつ、シート外へも生育範囲を拡大させていた。したがって、地下茎による伸長や種子の拡散によって生育範囲が拡大したものと判断された。また、この生育密度は450本/m²に達した。この生育密度は東播海岸の造成アマモ場あるいは自生アマモ場のそれ(表3.6.1)より倍ほども大きな値である。こうした現地試験の結果は、激浪時でもアマモの生育が可能とした事前の数値計算による適地評価の結果と一致している。したがって、数値計算を用いたアマモ場造成箇所の事前評価は有効であったことが確認されたといえる。

一方、初期の発芽数が多かった田尻漁港内の泊地では、生長期に入っても生育数の増加は少なく、生長したアマモは葉も細く弱々しいものであった。これは、敷設したシート上に漁船が係留されることが多く、アマモの生育に必要な光が十分に届いていなかったためと推測した。実際、播種シート敷設後5年以上が経過した2009年5月では、この場所からアマモの生育は確認できなかった。

岡田漁港入口で発芽生育数が低いのは、常に波・流れの影響を大きく受けたためと考えられる。この岡田漁港入口での生育数も2005年5月の時点で徐々にではあるが生育密度を増やしており、以後の拡大が期待された。事実、2009年5月には生育密度が220本/m²と

なり，樽井サザンビーチの東側のアマモ場には及ばないものの東播海岸の事例(表 3.6.1)と同等かそれ以上の生育密度となっている。また，生育範囲も播種シートの外へ広く拡大しており，地下茎の伸長とともに種子の拡散によって生育範囲の拡大が図られたものと考えられた。

幼苗移植ポットにおける生育数の変化は播種シートと似た傾向を示している。葉長は全体的に播種シート上で生長したアマモより長い傾向にある。これは播種時期が 2 ヶ月以上早いため，生長の度合いも早かったものと考えられる。なお，2004 年 5 月の調査時に移植ポット苗を掘り起こして観察したところ，写真 5.2.5 に示すようにポットは分解することなく原型をとどめていた。そして，アマモの地下茎から伸びる根束は自然素材からなるポットを貫いていたが，地下茎自体はポットから外に伸びていなかった。これは地下茎の分枝が阻害されている可能性が考えられ，材料あるいは移植方法に改善の余地が認められた。

このようにいくつかの課題は残されたものの，これらの現地試験結果はアマモ場が消失してしまった海域でも，適切な実施場所を選択し，播種あるいは移植によって 5 年を超えて存在するアマモ場の再生が可能であることを示した。

表 5.2.6 播種シートからの発芽生育数

	樽井サザンビーチ		岡田漁港入口		田尻漁港内泊地	
	発芽生育数 (本/m ²)	代表葉長 (cm)	発芽生育数 (本/m ²)	代表葉長 (cm)	発芽生育数 (本/m ²)	代表葉長 (cm)
2004 年 2 月	4.2	5	0.2	5	5.8	5
2004 年 5 月	80.7	60	2.7	50	19.3	45
2004 年 11 月	58.0	40	7.3	25	0	—
2005 年 3 月	92.0	70	16.7	60	4.0	15
2005 年 5 月	185.3	200	50.0	200	3.4	75
2009 年 5 月	450.0	85	220.0	60	—	—

表 5.2.7 移植ポットからの生育数

	樽井サザンビーチ		岡田漁港入口		田尻漁港内泊地	
	生育数(本)	代表葉長 (cm)	生育数(本)	代表葉長 (cm)	生育数(本)	代表葉長 (cm)
2004 年 2 月	42	20	0	—	4	20
2004 年 5 月	55	130	0	—	3	60
2004 年 11 月	39	40	0	—	0	—



写真 5.2.4 生長したアマモの一例
(2004 年 11 月の樽井サザンビーチの東側)



写真 5.2.5 移植 5 ヶ月後のポット (2004 年 5 月)

5.3 阪南2区人工干潟でのアマモ場創出

5.3.1 実施海域の概要

大阪府岸和田市沖で大阪府港湾局により実施されている阪南2区整備事業(図5.3.1)は、港湾物流機能の強化・拡充、背後市街地の環境改善および緑地等水辺環境の整備を図り、併せて地域の振興に寄与することを目的とした約142haの埋立事業である(大阪府港湾局, 2003)。その整備地内の一面には、図5.3.2に示すように全体で5.4ha、干出部1.7haの干潟が造成された(以後、阪南2区人工干潟と記す)。この干潟は、約1km沖合いの水深が8m~12mと比較的深い場所に位置し、既設の石積みの護岸と土留め潜堤で囲みを作った中に軟弱で非常に流動性に富む浚渫粘性土を投入して造成されている。また、軟弱な基盤材料に対して潮間帯を確保するために、護岸と潜堤の間に中仕切り堤を築造し、この護岸と中仕切り堤の間で潮間帯が形成されている(図5.3.3)。さらにこの潮間帯には浚渫粘性土の上に約30~120cmの厚さで覆砂がなされている(鶴ヶ崎, 2006)。

この阪南2区人工干潟では、2003年から国土交通省国土技術政策総合研究所が中心となって、都市部に干潟を再生できることを実証し、干潟やも場、ヨシ原が持つ海水浄化機能や生物生息機能等を活用した海域環境の改善技術や豊かな生態系の再生技術確立することを目的に官学民の共同研究が行われた(国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部海洋環境研究室, 2007)。阪南2区人工干潟でのアマモ場造成は、この共同研究の一環として実施したものである。

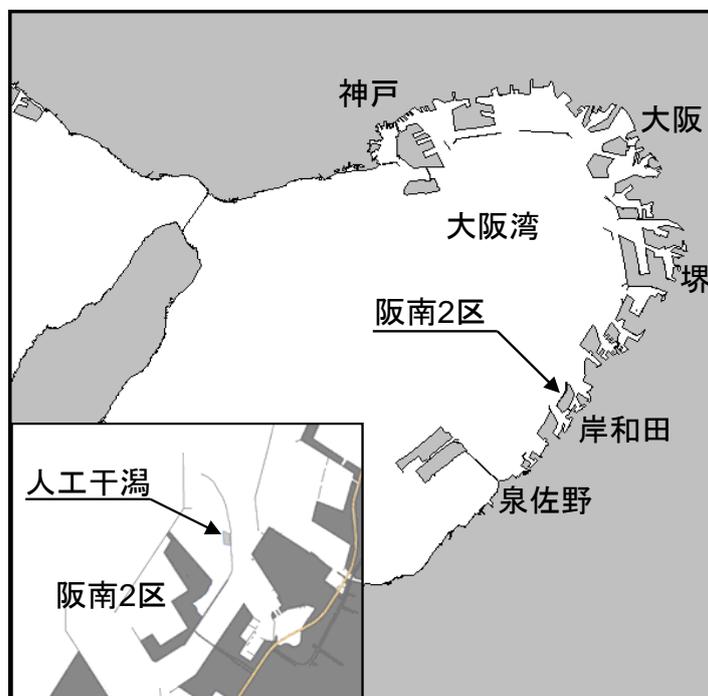


図 5.3.1 阪南2区位置図

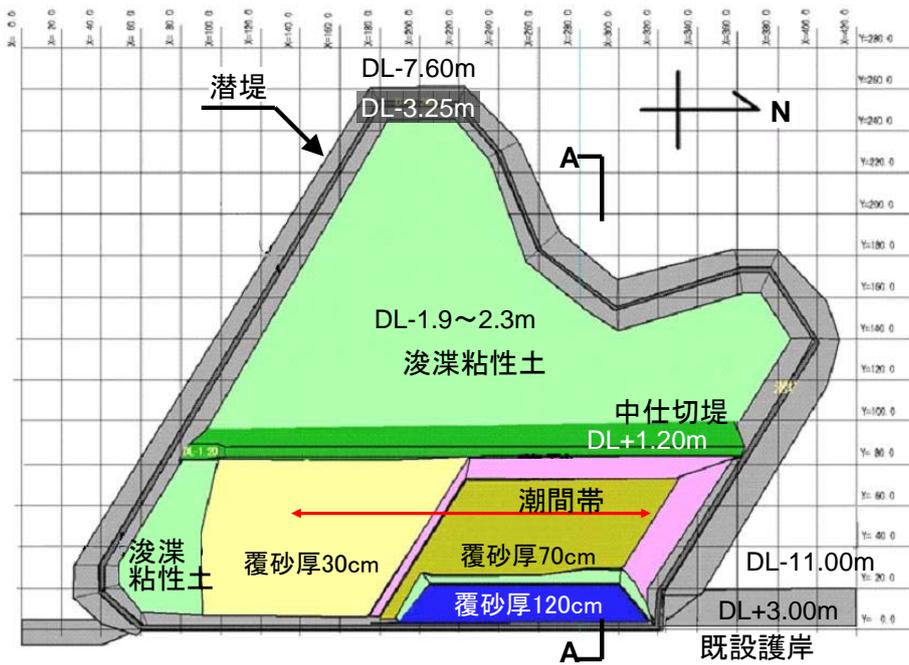


图 5.3.2 阪南 2 区人工干潟平面図(鶴ヶ崎, 2006)

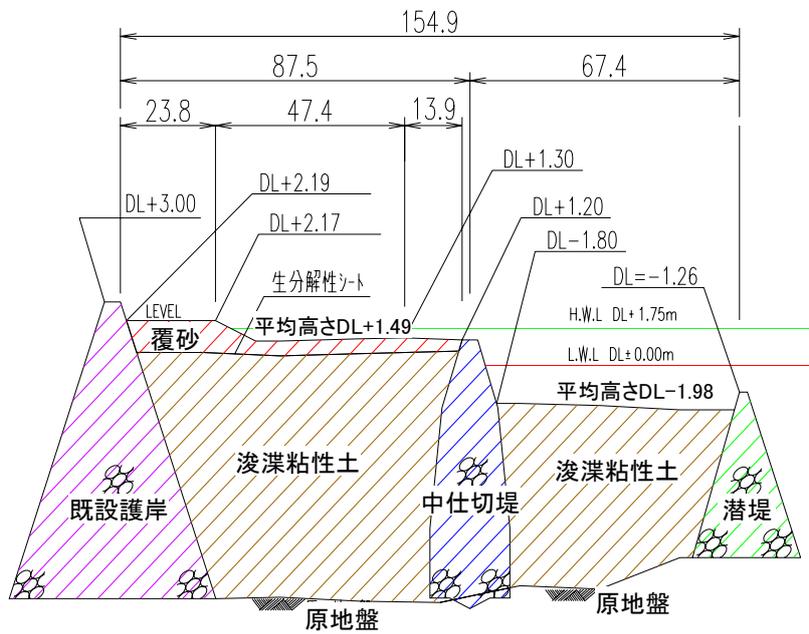


图 5.3.3 干潟代表断面図(A-A 断面 ; H:V=1:5) (鶴ヶ崎, 2006)

5.3.2 アマモ場造成実験

(1) 実施地点とアマモ場造成方法

阪南 2 区人工干潟は、**図 5.3.1** に示したように周囲を既設護岸で囲われた埋立予定地内に造成されたため、外海からの波がほとんど作用しない場所にある。さらに、人工干潟の中で底質の粒度組成がアマモの生育に適したシルト分以下 30%以下(国土交通省港湾局監修/海の自然再生ワーキンググループ, 2003)を満たす区域は覆砂施工区域だけであり、これは中仕切りの背後に位置しているため、波の影響は極めて弱い場所であると考えられた。また、干潟造成に使用された浚渫粘性土の材料特性に起因して海底勾配が余りないことから水深変化が乏しく、アマモ場造成に適した場所を選定する余地は限られていた。そのため、この阪南 2 区人工干潟におけるアマモ場造成では 3 次元地形変化計算による適地評価は実施せず、主に水深と底質から造成場所を選定した。検討の結果、アマモ場造成は**図 5.3.4** に示す中仕切り堤内側の覆砂施工区域で出来る限り水深を確保するよう、覆砂施工区域端部付近の水深約 1.4mの浅場(地点 A)とした。**図 5.3.5** に地点 A における底質の粒度分布を示す。図にはアマモ場造成開始時の 2004 年 11 月と約 1 年 7 ヶ月後の 2006 年 6 月の結果と比較のために天然のアマモ場が広く分布する兵庫県赤穂市海浜公園前の粒度分布も示した。**図 5.3.5** によれば、地点 A の底質は赤穂市海浜公園前よりもかなり粗く、シルト分以下も少ないことがわかる。また、造成後に若干細粒分が増えているが、上に記したアマモの生育に適するとされるシルト分以下 30%を超過してはいない。

アマモ場造成はまた、中仕切り堤の外側の浚渫粘性土が剥き出しになっていた水深約 3 m(地点 B)でも 粘性土地盤上での播種シートによるアマモ場造成の可能性を検討することを目的に実施した。

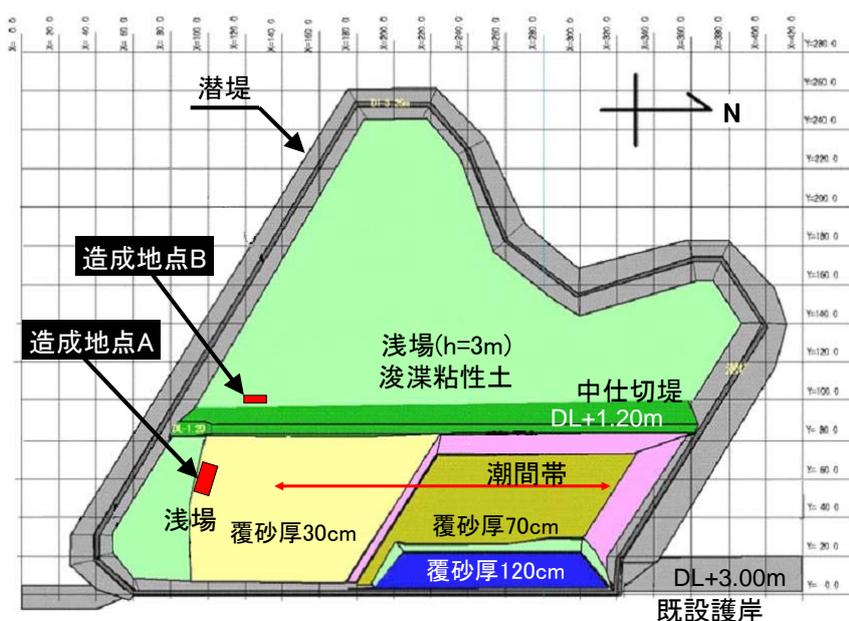


図 5.3.4 アマモ場造成実施位置

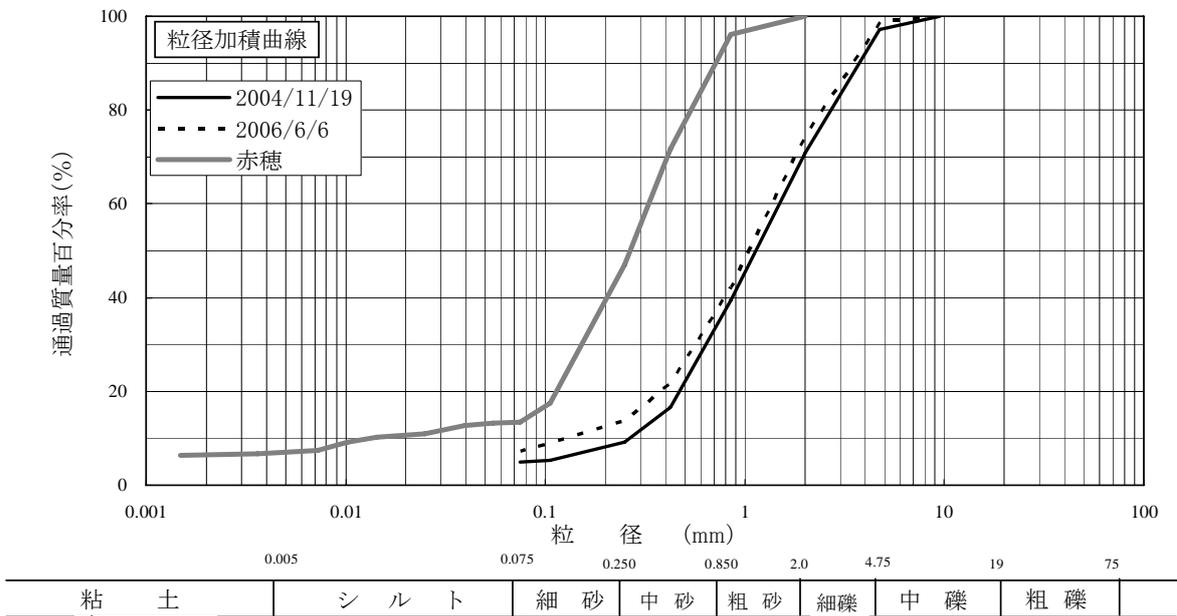


図 5.3.5 地点 A における底質の粒径加積曲線

造成方法は東播海岸およびりんくうタウン海域と同じく播種シートを用い、2004年11月に覆砂上の地点Aには合計80m²の播種シートを、粘性土地盤上の地点Bには16m²の播種シートを敷設した。さらに、2004年9月から移植用の幼苗を陸上の育苗ポットの中で育て、1ポットあたり10本程度、草丈10cm程度に育ったポット苗74個を造成地点Aにポットごと埋設した。移植用ポットは、りんくうタウン海域で使用した市販の天然素材ポットに加えて、りんくうタウン海域における移植作業時にポットが倒れてアマモ幼苗が流失したことを踏まえて、生分解性の織布で直径5cm、高さ5cm程度の巾着袋を作って育苗ポットとした(写真5.3.1および5.3.2)。移植前のアマモの育苗状況を写真5.3.3および5.3.4に示す。なお、りんくうタウン海域に移植した幼苗(写真5.2.2)と比較すると、この阪南2区人工干潟用の幼苗は生育が良好であった。育苗環境および育苗期間に大きな差がないことから、使用した種子の健全性の違いが原因と考えられるが、育苗環境の違いを詳細に検証するには至らなかった。



写真 5.3.1 生分解性織布製育苗ポット



写真 5.3.2 播種状況



写真 5.3.3 育苗状況
(生分解性織布製育苗ポット)



写真 5.3.4 育苗状況
(市販天然素材ポット)

(2) 追跡調査の結果

2004年11月の播種シート敷設および幼苗移植後、ほぼ3ヵ月ごとに各造成地点におけるアマモの発芽生育数、移植したポット苗の株数、葉長について追跡調査を実施した。

造成地点AおよびBに敷設した播種シートからのアマモの単位面積当たりの発芽生育数(生育密度)と平均葉長を表5.3.1に示す。表5.3.1によれば、地点AおよびBともに、シート敷設後約3ヶ月の2005年1月の調査時には、まだアマモの発芽は確認されていないが、その後、時間の経過とともに発芽生育数が増大し、夏を過ぎるとアマモのライフサイクルに従って生育数が減少した。地点AおよびBともに同様の生育密度の増減を示したが、地点Bのほうが全体に生育密度が高い傾向にあるのが特徴的である。そして、2回目の繁茂期となる2006年5月には水深が約1.4mの地点Aでは48.9本/m²、水深が約3mの地点Bでは162.5本/m²の高い値を示した。特に地点Bのアマモは水面に届くほどの草丈を示した。このとき、地点Aのアマモには花枝は見られなかったが、地点Bのアマモには花枝が多く見られ、翌年以降のアマモ場の拡大が期待された。2006年5月の調査時の地点AおよびBのアマモの様子を写真5.3.5および5.3.6に示す。しかしながら、2006年9月の時点で地点Aではアマモの草体を確認できず、地点Bでは生育密度が0.4本/m²に激減した。そして3回目の繁茂期翌となる2007年5月の地点Aではアマモの草体を確認できず、地点Bでは生育密度が5.2本/m²と1年目と同レベルまで落ち込み、さらに翌2008年3月では地点AおよびBともに、アマモの生残を確認できなかった。なお、潜水土による海域の状況観察によれば、水深が浅い地点Aは夏期にアナアオサが大量に堆積すること、粘性土地盤上の地点Bは浮泥の堆積とその舞い上がりによる視界の悪さが特徴的であった。

一方、表5.3.2に造成地点Aに移植した幼苗の推移を示す。2004年11月の移植時点で幼苗の生育本数はカウントできていないが、市販天然素材ポットは44鉢、生分解性織布製ポットは30鉢を移植したのに対し、移植後約3ヶ月の調査時にアマモの幼苗が生残していたポット数は、市販天然素材ポットが24鉢、生分解性織布製ポットが10鉢と激減していた。移植された幼苗を写真5.3.7に示す。その後の生育数は表5.3.2に示すとおり、生分解性織布製ポットは2005年6月の時点で、市販天然素材ポットは2005年8月の時点でアマモの草体を確認できなくなった。翌春の2006年3月に生分解性織布製ポットから1本のアマモが確認されたが、それも2006年5月には消失した。それ以降、移植ポットからはアマモが確認されず、移植したアマモは死滅したものと考えられた。

このように、従来アマモが存在していない港湾域に造成された人工干潟の浅海部にアマモ場の創出を試みた結果は、播種シートを用いた造成では3年で、幼苗移植による造成は1年でアマモが消滅するという芳しくない結果に終わった。

表 5.3.1 播種シートからの発芽生育数

	地点 A (水深約 1.4m)		地点 B (水深約 3m)	
	発芽生育数 (本/m ²)	平均葉長 (cm)	発芽生育数 (本/m ²)	平均葉長 (cm)
2005 年 1 月	0.0	-	0.0	-
2005 年 4 月	1.7	9	7.6	15
2005 年 6 月	12.2	43	-	-
2005 年 8 月	0.2	18	3.8	32
2005 年 11 月	0.0	23	2.4	38
2006 年 3 月	8.4	14	57.0	45
2006 年 5 月	48.9	49	162.5	130
2006 年 9 月	0.0	-	0.4	40
2007 年 5 月	0.0	-	5.2	50
2008 年 3 月	0.0	-	0.0	-

※2005 年 6 月の地点 B は計測未実施

表 5.3.2 移植ポットからの生育数

	市販天然素材ポット		生分解性織布製ポット	
	生育数(本)	平均葉長(cm)	生育数(本)	平均葉長(cm)
2005 年 1 月	74	14	29	7
2005 年 4 月	65	32	15	24
2005 年 6 月	17	40	0	-
2005 年 8 月	0	-	0	-
2005 年 11 月	0	-	0	-
2006 年 3 月	0	-	1	5
2006 年 5 月	0	-	0	-
2006 年 9 月	0	-	0	-
2007 年 5 月	0	-	0	-
2008 年 3 月	0	-	0	-



写真 5.3.5 地点 A のアマモ (播種シート ; 2006 年 5 月)



写真 5.3.6 地点 B のアマモ (播種シート ; 2006 年 5 月)



写真 5.3.7 地点 A の移植アマモ (2005 年 1 月)

(3) 造成アマモ場の衰退原因

造成地点 A では播種シートによるアマモ場造成と平行して現地の海象条件を把握するため、波高を計測した。

表 5.3.3 に 2004 年 12 月から 2005 年 10 月の間、地点 A に設置した水圧式波高計(アレック電子社製, Compact-WH)で計測した水位変動から算出した月間最大有義波を示す。計測は毎偶正時を挟む 10 分間をサンプリング間隔 0.5 秒で実施し、解析はゼロ・アップ・クロス法による波別解析を実施した。表 5.3.3 によるとアマモ場造成地点 A に来襲する有義波高は最大で台風 0514 号の接近に伴い観測した 0.14m で、台風の影響を受けなければ 0.05m 程度と小さい。有義波周期は地形的にフェッチが短い分、台風の影響を受けなければ 4~6 秒程度であるが、台風によるうねりが入ってくると 12 秒程度と比較的長くなる。しかしながら、この程度の波高ではアマモの生残に影響を及ぼすとは考え難く、実際、表 5.3.1 に示したようにこの期間の播種シートからの発芽生育数の変化とは対応していないと判断された。

表 5.3.3 波浪観測結果(月間最大有義波；水深 1.4m)

	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	備考
2004 年 12 月	0.10	9.8	
2005 年 1 月	0.06	4.3	
2005 年 2 月	0.10	4.3	
2005 年 3 月	0.06	5.3	
2005 年 4 月	0.05	5.8	
2005 年 5 月	0.05	5.3	
2005 年 6 月	0.05	12.6	T0504
2005 年 7 月	0.06	12.0	
2005 年 8 月	0.09	13.8	T0511
2005 年 9 月	0.14	11.2	T0514
2005 年 10 月	0.10	5.2	

しかしながら、気象庁の気象統計情報より日々の天気図を確認すると、播種シートのアマモ生育数が激減した 2006 年 5 月から 2006 年 9 月の期間、2006 年 8 月 18 日には台風 0610 号が宮崎市付近に上陸、追跡調査直前の 9 月 17 日にも台風 0613 号が長崎県佐世保市付近に上陸しており、こうした台風の影響による高波浪がアマモ株の減少の原因となったことも否定できない。ただし、同じく気象庁の気象統計情報より関空島での月ごとの最大風速をみると、有義波高 0.14m を観測した 2005 年 9 月の最大風速が 20m/s なのに対し、2006 年 8 月が 14m/s、9 月が 17m/s といずれも 2005 年 9 月より小さい。

ところで、地点 A について潜水調査により明らかとなった特徴的なことは、2005 年 6 月、同 8 月および 2006 年 9 月の調査時に造成区を含む周辺の海底を一面にアオサ(アナアオサ)が覆っていたことである(写真 5.3.8)。これらの調査を挟む 2005 年 4 月、2005 年 11 月、2006 年 5 月および 2007 年 5 月にはこうしたアオサの大量発生は観察されていない。こうしたことから、夏期のアオサの大量発生によりアマモの上にアオサが被さり、アマモの生育に必要な光を阻害したことが考えられた。そこで、2006 年 9 月の調査時に水中光量子計(LI-COR 社製 LI-250)を用いて海面とアオサ表面、アオサの下の光合成光量子束密度の測定を実施した。その光合成光量子束密度の測定結果を表 5.3.4 に示す。表 5.3.4 が示すように、晴天の日のアオサ上では $400 \mu \text{ mol/s/m}^2$ の光合成光量子束密度を示し、これは海面における光合成光量子束密度の 36%に相当する。また、アオサの下での光合成光量子束密度は $2.1 \mu \text{ mol/s/m}^2$ で、これは海面の 0.2%に過ぎない。川崎ら(1988)によるとアマモ場造成適地の水中光量子量は年平均値で $3\text{E/m}^2/\text{day}(=11.6 \mu \text{ mol/s/m}^2)$ であり、表 5.3.4 の値はほぼ瞬間値ではあるが、アオサ上ではこれよりも大きく、アオサの下ではこれよりもかなり小さい。また、阿部(2005)によるとアマモの光合成と呼吸が釣り合う光補償点は $6.89 \sim 13.67 \mu \text{ mol/s/m}^2$ であり、アオサの下で計測された光合成光量子束密度はこれより小さい。したがってアマモがアオサ上にあれば十分に光合成が行えるが、アマモがアオサに覆われてしまうと十分な光合成が出来ず、その期間が長く継続するとアマモが死滅する可能性が考えられた。よって、地点 A におけるアマモの衰退は競合生物であるアオサに覆われ、光環境が悪化したことが一因と考えられた。アマモ場造成において、このアオサとの競合は解決すべき大きな課題である。

表 5.3.4 光合成光量子束密度の測定結果(地点 A)

実施日	2006 年 9 月 20 日		
水深	1.5m		
天候	晴れ		
アオサの層厚	約 20cm		
光合成光量子束密度 ($\mu \text{ mol/s/m}^2$)	海面	1,100	100%
	アオサ上	400	36%
	アオサ下	2.1	0.2%



写真 5.3.8 アマモ場造成地を覆うアオサ(地点 A ; 2006 年 9 月)

一方、水深が約 3m と深い地点 B に対しては、波浪観測は実施していないものの地点 A における観測結果等から、アマモの生育数の変化に波浪が大きな影響を及ぼしたとは考え難い。地点 B に対する潜水調査からは、地点 A のようにアオサが一面を覆うことは確認されていない。その一方で地点 B では播種シート敷設後の早い時期からシート上への泥質の堆積と、海底上 0.5m 程度までの間で濁りによる視界の悪さが報告されている。また、ダイバーが少し動くと容易に浮泥が舞い上がり、さらに海水の透明度が悪化することも報告されている。この阪南 2 区人工干潟周辺の阪南 2 区整備事業区域内では、継続的に埋立のための浚渫土の投入が土運船による直投方式で実施されていた。したがって、そこで発生した濁りが播種シート敷設地点にも到達、沈降し、播種シートあるいはアマモの葉上に堆積した可能性が考えられる。2006 年 5 月の調査時に、地点 B で生長したアマモが海面に届くまで草丈を伸ばしていたが、これは透明度の悪化による光量不足を補おうとしているように推察され、濁りによる光環境の悪化の証左と考えられた。

この光環境を検証するため、2007 年 5 月の追跡調査時に地点 B に電磁流速計(水温センサー付、アレック電子社製 Compact-EM)と照度計(アレック電子社製 MDS-MkV/L)を設置し、海底上 30cm の水平流速と水温、水中照度の計測を試みたが、残念ながら水中照度については不手際により有意なデータを得ることが出来なかった。2007 年 6 月 1 日から同 7 月 31 日の流速と水温の変化を図 5.3.6 および図 5.3.7 に示す。図 5.3.6 および図 5.3.7 の流速および水温はともに 20 分ごとにサンプリングタイム 1 秒で 30 個取得したデータから平均値を求め、それらから 1 日毎の最大値をプロットしたものである。流速について示した図 5.3.6 によれば、この地点での日最大流速は最大で 18cm/s 程度、多くは 6cm/s 程度とか

なり小さい。しかしながら、港湾工事における濁り影響予測の手引き(国土交通省港湾局, 2004)によれば, この流速 6cm/s は粗粒分と細粒分を分ける $75\mu\text{m}$ の汚濁限界流速程度に相当する。すなわち, 流速が 6cm/s 程度以上あると沈殿堆積した細粒分が再浮上し, 濁りとなって浮遊し続ける状態となる。地点 B が浚渫粘性土を投入して造成された浅場で覆砂がされていないこと, 周辺からの土砂投入による濁りが到達することを考えると, この地点は恒常的に濁りが存在すると考えられ, 潜水調査による底層 0.5m 程度の濁りの存在を説明しうる。水温を示した図 5.3.7 によれば, 6 月以降水温は徐々に上昇し, アマモの生育限界といわれる 28°C (例えば, 阿部, 2005)に近づいている。夏の高水温は 9 月程度までは継続すると考えられ, 図 2.3.1 に示したアマモの生育に適した環境条件である月平均水温 28°C 以下に抵触する事態も考えられた。このことは更に水深が 1.5m 程度と浅い地点 A では顕著であると考えられ, 地点 A のアマモの衰退原因には先述したアオサによる光阻害のほか, 高水温の影響も一因として考えられた。

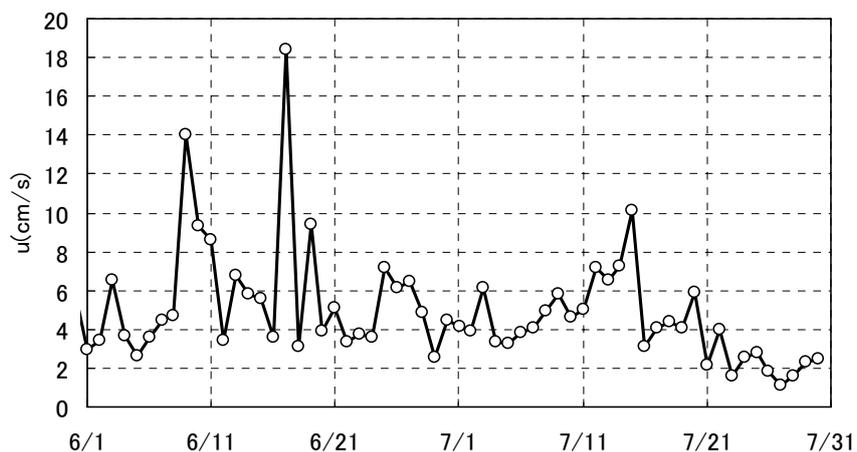


図 5.3.6 流速の観測結果(地点 B 海底上 30cm ; 2007 年 6 月~7 月)

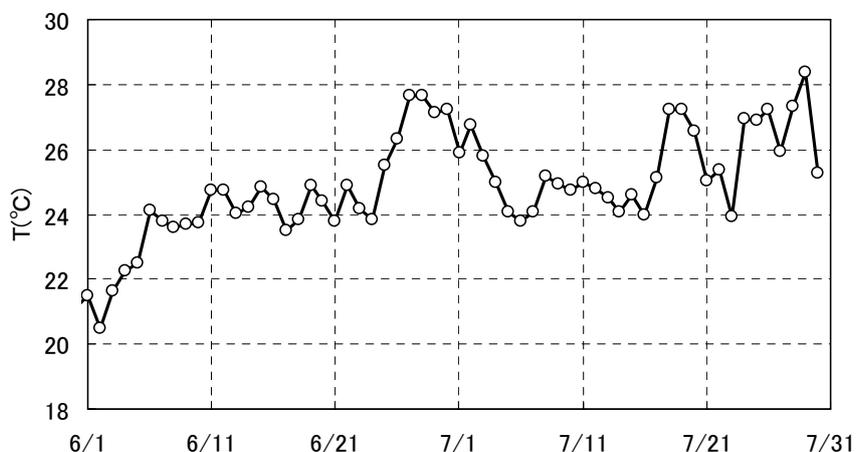


図 5.3.7 水温の観測結果(地点 B 海底上 30cm ; 2007 年 6 月~7 月)

なお、地点 A に移植した幼苗の生残数の減少は 2004 年 11 月の移植以降、2005 年 6 月ないし 8 月までに生じていることから、その原因はいままでに取り上げた波浪、アオサ、高水温といった項目では説明が付かない。流速については直接現地計測を実施していないが、島谷ら(2003)によって、6mm 以上被砂した種子から発芽し、草丈が 10cm 程度に生長した実生株であれば 50cm/s 程度の振動流では流失しないことが確認されているので、流速が地点 A における幼苗の生残数の決定的な減少原因とは考え難い。移植時のポットの埋め込み深さやアマモとポット素材との相性など、移植方法に問題があった可能性も考えられ、より確実なアマモ場造成を確立するための今後の検討課題である。

5.4 アマモ場の再生に関する一考察

りんくうタウン海域におけるアマモ場造成の結果から、かつては繁茂していたアマモ場が衰退した海域でも播種および移植後 5 年以上にわたって造成したアマモ場が存続したことから、適切な海域を選択すれば持続的なアマモ場の再生は可能であるといえる。また、従来アマモが存在していない港湾域に造成された阪南 2 区人工干潟前面でのアマモ場造成では、播種シートにより複数年に渡り存続したアマモ場を造成することが出来たことから、こうした場でも新たなアマモ場創出の可能性を示せた。同時に、阪南 2 区人工干潟では、濁りの影響による光量不足と推測される原因により、結果的には 3 年でそのアマモ場が消滅したことから、アマモ場造成を行おうとする海域の光環境すなわち水質の重要性を改めて浮き彫りにしたといえる。

そこで、これらから得られた知見をもとにアマモ場の再生の方法について考察する。以前繁茂していたアマモ場が衰退した原因には、浅場の消失や水質の悪化による光の不足などが考えられるが、アマモ場衰退後の水質の改善や人工海浜の整備といった新たな浅海岸の創出、あるいは突堤や離岸堤などの多様な海岸保全施設の整備による静穏域の出現といった環境変化により、一度アマモ場が衰退した海域でもアマモが育つ環境が回復したところは少なくない。すなわちりんくうタウン海域の樽井サザンビーチの東側は幼苗移植、特に播種シートの敷設によって十分な生育密度のアマモ場が造成できたのでアマモが育つ環境は整っていたといえる。こうした所にアマモの種子が自然に流入すれば、アマモ場の自然回復も可能であろう。実際、2006 年 3 月 14 日の産経新聞によると、阪南 2 区がある岸和田市の南隣に位置する貝塚市において、人工海浜である二色の浜海水浴場前面にアマモの自生が確認されたと報道されている。

しかしながら、アマモの種子が自然には供給されない、あるいは供給される可能性はあっても現時点でアマモ場が存在しない場で、アマモ場を早期に再生・創出するには人為的な播種あるいは移植によるアマモ場造成が有効である。すなわち、アマモ場を再生・創出させるには、ある程度水質がよい海域で人工海浜の前面のように浅場が形成され、かつ構造物などにより波が遮蔽されるといった人為的に環境が整備された場所を選ぶことが重要である。また、特に播種法では確実にアマモの種子を固定して発芽生育させることが重要であり、この点ここで検証してきた播種シートによるアマモ場造成法は非常に有効なツールであるといえる。

5.5 まとめ

本章では、かつては広くアマモ場が存在したが、現在では沿岸の開発などにより消失した海域を対象に、前章までに記した造成適地の評価手法を適用して実施海域を選定し、その上で播種シート工法を適用してアマモ場消失海域でのアマモ場再生の可否を検証した結果について記した。さらに、従来アマモ場が存在しなかった海域でのアマモ場創出の試みとして、港湾域に新設された人工干潟の浅海部でアマモ場造成を試みた結果を記した。主要な結論は以下の通りである。

- (1) りんくうタウン海域のうち樽井サザンビーチの東側および田尻漁港南西側の人工海浜前面の2海域に、事前に3次元海浜変形計算を用いたアマモ場の造成適地評価手法を適用して、試験実施の可否について検討した。
- (2) 神戸港の波浪観測データに基づき設定した激浪時諸元と冬期波浪時諸元を用いた検討の結果、樽井サザンビーチの東側では対象区域内の突堤付近に激浪時と冬期波浪時の造成適地が重なって分布しており、アマモ場造成にとって有望であると判断された。一方、田尻漁港南西側の人工海浜前面は、冬期波浪時には適地があるが、激浪時には適地が存在しないことから、アマモ場造成にとっては厳しい海域であると判断された。
- (3) 2003年12月に樽井サザンビーチの東側の造成適地と判定された区域に播種シートを敷設し、また室内で生産した幼苗を移植したところ、敷設後5年以上が経過した2009年5月の時点でも良好なアマモ群落を形成・維持している。
- (4) この樽井サザンビーチにおけるアマモ場造成事例は、アマモ場が衰退してしまった海域でも、適切な海域を選定すれば、アマモ場造成は可能であることを実証したものである。同時に数値計算による造成候補地の事前評価の有効性が示された。
- (5) 水深が10m前後と深い港湾域に新たに造成された阪南2区人工干潟の前面の浅場でアマモ場の創出を試みたところ、1年以上群落を維持はしたが、その後消滅した。
- (6) その原因として、水深が1.5m(底質は覆砂施工済み)と浅い場では競合生物であるアオサの大繁殖による光の阻害が推測された。また、夏の高水温の影響も考えられた。
- (7) 水深が約3mの粘性土地盤上では、継続的に存在する底層の濁りによる光環境の悪化が原因であると推測された。これには、人工干潟周辺で継続中の埋立工事(土砂投入)による濁りの影響も含まれると考えられた。
- (8) 阪南2区人工干潟前面でのアマモ場造成結果より、港湾域に造成された浅場でも、アマモの生育に必要な光環境が確保できればアマモ場を維持できることが示唆された。ただし、アマモ場造成においてアオサとの競合は大きな課題である。
- (9) アマモ場が衰退してしまった海域でアマモ場を再生させる、あるいは従来アマモ場が存在しなかった海域で新たにアマモ場を創出させるには、ある程度透明度がよい海域で人工海浜の前面のように浅場が形成され、かつ構造物などにより波が遮蔽されるといった

人為的に環境が整備された場所を選ぶとともに、播種法では確実にアマモの種子を固定することが重要である。この点、ここで検証してきた播種シートによるアマモ場造成法は非常に有効なツールであることが実証された。

参考文献

- 阿部真比古(2005)：アマモ群落の構造と環境特性に関する研究，三重大学大学院博士論文，101p.
- 有田 守・出口一郎・岩田公司・芳田利春(2007)：地形変化と生息過程を考慮したアマモ場適地選定手法に関する研究，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.1086-1090.
- 有田 守・芝崎拓弥・出口一郎(2008)：アマモ場による波浪減衰効果を考慮した適地選定手法に関する研究，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.786-790.
- 大阪府港湾局(2003)：ちきりアイランド<阪南 2 区>，パンフレット.
- 金澤 剛・明松正二・多賀 博・稲田 勉(2005)：も場衰退海域におけるアマモ場再生試験について，海洋開発論文集，第 21 巻，pp.677-682.
- 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)：アマモ場造成に関する研究，電力中央研究所報告，総合報告：U14，231p.
- 環境省(2004)：藻場の復元に関する配慮事項，100p.
- 国土交通省港湾局(2004)：港湾工事における濁り影響予測の手引き，pp.15-18.
- 国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ(2003)：海の自然再生ハンドブック-その計画・技術・実践- 第 3 巻藻場編，pp.92- 95.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(1994)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1993)，p.855.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(1995)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1994)，p.855.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(1996)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1995)，p.906.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(1997)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1996)，p.970.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(1998)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1997)，p.1060.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(1999)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1998)，p.656.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(2000)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 1999)，p.704.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(2001)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 2000)，p.746.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(2002)：全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS 2001)，p.734.
- 国土交通省港湾局監修，(財)沿岸技術研究センター(2003)：全国港湾海洋波浪観測資料

(NOWPHAS 2002), CD.

国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部海洋環境研究室(2007), 干潟を創る 都市臨海部に干潟を取り戻すプロジェクト 阪南 2 区干潟創造実験の試み, 22p.

島谷 学・中瀬浩太・中山哲巖・太田雅隆・月館真理雄・星野高士・内山雄介・灘岡和夫(2001): 人工リーフ設置による外力場の変化とアマモ分布条件との関係について, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.1156-1160.

島谷 学・中瀬浩太・岩本裕之・中山哲巖・月館真理雄・星野高士・内山雄介・灘岡和夫(2002): 興津海岸におけるアマモ分布条件について, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.1161-1165.

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, 第 50 巻, pp.1096-1100.

水産庁・(社) マリノフォーラム 21(2007a): アマモ類の自然再生ガイドライン, 128p.

水産庁・(社) マリノフォーラム 21(2007b): アマモ類の自然再生ガイドライン・巻末資料, 97p.

鈴木康正・森川高德・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, 35p.

高山知司・池田直太・平石哲也(1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第 30 巻, 第 1 号, pp.21-67.

田中 仁・Ahmad 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.

鶴ヶ崎和博(2006): 浚渫土砂を用いた人工干潟の造成 -大阪湾阪南港阪南 2 区人工干潟の造成-, Marine Voice 21, Vol.247, pp.28-31.

出口一郎・三宅亮志・岩田公司・芳田利春・荒木進歩(2005): ライフサイクルを考慮したアマモの生息条件に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1011-1015.

中瀬浩太, 田中裕一, 桧山博昭(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, 海岸工学論文集, 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, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.1061-1065.

中辻啓二・藤原建紀(1995): 大阪湾におけるエスチャリー循環機構, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.396-400.

藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫(1989): 大阪湾の恒流と潮流・渦, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.209-213.

山本省吾・中瀬浩太・山本裕規・羽原浩史・岡田光正(2004): 光量, 航走波, 潮流環境変化による移植アマモ場の維持・拡大機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.1041-1045.

渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・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 回海講論文集, pp.406-410.

第 6 章 結論

本論文は、確実性が高く、コストも低減可能なアマモ場造成法の確立を目指し開発された播種シートによるアマモ場造成法の有効性を現地実証試験により検証し、加えてこのアマモ場造成法の確実性を更に向上させるために数値計算による適地評価の手法を開発し、検証した結果を中心に、実際に継続的に存在するアマモ場の造成に取り組んだ成果である。各章で得られた主要な結論を以下に示す。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的について述べた。また、フローチャートにより本論文の構成について述べた。

第 2 章では、確実かつ効率の良いアマモ場造成の実施に先立ち、アマモの生活史とアマモ場の成立条件について整理した。そして元来、浅場が少なく、残された浅場もほとんどが埋め立てられた大阪湾でアマモ場を再生することが出来れば、その手法は他海域へも適用することが可能と考え、大阪湾を検討対象の海域として取り上げることとした。その上でアマモ場の再生を検討するには、過去にどのような場所にアマモ場が存在していたのかを把握して、その海域におけるアマモ場再生の方向性を得ることが重要と考え、大阪湾におけるアマモ場の衰退の様子を調査した結果について述べた。得られた成果は以下のよう
にまとめられる。

- (1) 過去の大阪湾沿岸部の浅場にはアマモ場が散在していたが、昭和 30 年以降の経済復興に伴う沿岸部の埋立と大阪湾の透明度の低下によりアマモ場は殆ど消滅した。
- (2) しかしながら、瀬戸内海の水質保全規制や周辺諸都市の下水道整備などにより、大阪湾の水質、特に透明度の改善傾向がみられること、また、海岸の親水性を高めるために多くの人工海浜が造成されるようになったことから、自然にアマモが回帰する海域もみられるようになった。
- (3) 今後の大阪湾におけるアマモ場造成の方向性としては、湾内の時計回りの恒流と海水の透明度を勘案して、できるだけその上流側で造成を行って種子の供給基地とし、下流域は自然な再生を期待することが考えられた。

第 3 章では、既往のアマモ場造成方法をレビューした後、確実なアマモ場造成を目指し、かつ大規模に造成が可能な方法として開発された播種シート工法について述べた。さらに、播種法では極めて重要な要素である播種するまでの間の健全なアマモ種子の取り扱い方法について述べた。そして、大阪湾にごく近い兵庫県明石市の東播海岸地先で実施した播種シートを用いた比較的大規模な実海域試験について、設置後 10 年近く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明らかにした本アマモ場造成工法の有効性について

示した。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) アマモ場造成法の中核となる播種・移植技術は、栄養株移植、苗移植および種子を播く播種法の3つに大別される。
- (2) 栄養株移植は天然のアマモ場から栄養株を採取して移植する方法であり、栄養株の採取と移植がダイバー作業に依存するため、大規模なアマモ場造成にはコストや労力の面で現実的であるとは言い難い。
- (3) 苗移植は、既存のアマモ場から採取した種子から移植に必要なアマモ種苗を人工的に生産して移植する方法であるが、移植作業はダイバー作業によるため、やはり大規模なアマモ場造成にはコストや労力の面で不利である。
- (4) 播種は、既存のアマモ場から採取した種子をアマモの発芽時期である冬期に直接造成現場に播く手法であり、アマモ種子を確実に造成地に固定するための各種手法が検討されている。
- (5) 播種シート工法は、アマモ種子を付着させた生分解性素材のシートを機械的に展張することを前提とし、ダイバーによる水中作業を極力低減させてコスト的にも大規模なアマモ場造成への適用を可能としたものである。
- (6) 播種シートは上部の生分解性不織布と下部のヤシ繊維からなるヤシマットの間にアマモ種子を挟みこみ、さらに播種シートを海底に設置した後のシートの舞い上がり防止用と陸上製作時の最後にシートをロール状に巻き取る際の引張りに対する補強部材として菱形金網を生分解性不織布の上に被せた構造とした。さらに、陸上作業中にアマモ種子が乾燥するのを防ぐため、アマモ種子は CMC(カルボキシメチルセルロース)の5%水溶液に混ぜて扱った。
- (7) アマモ種子の採種は、大量の種子を確保することを考慮すれば、花穂だけ採取するのではなく、花枝ごと採取する方が効率的であった。
- (8) アマモ種子を大量に養生する場合、岸壁に設置して目の海水を掛け流した屋外の海水流下水槽で、採取したアマモの花枝を水面に浮遊させると効率のよい養生が可能であった。
- (9) アマモ種子の養生には、アマモ種子を十分追熟させることが重要である。
- (10) 比較的小規模のアマモ種子の養生であれば、室内での小型水槽を用いて、海水を循環させることで可能である。この場合、人工海水の使用も可能である。
- (11) 検討した範囲では、アマモ種子の発芽率からみたアマモ種子の健全性は、室内養生より屋外養生が優れていた。屋外養生では種子の追熟時に日光の直射を受けたこと、常に新鮮な海水を掛け流したことによると考えられた。
- (12) 養生後のアマモ種子の保存については、天然の海水をろ過したものを使用して、自然界でアマモ種子が成熟し発芽を待つまでの水温に近い 15~20℃で保存するのが最も適していたが、水温が高いと保存中のアマモ種子への悪影響が懸念される微生物の活動にも好適となることから注意が必要とされた。この対策として、アマモの発芽条件より低い

10℃以下での保存がアマモ種子の健全性をさほど失わずに済み有効である。

- (13)明石市の東播海岸で実施したアマモ場造成試験の結果、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、造成初期の段階で発芽・生育数がかなり少なく、その原因には発芽・幼体期に冬期の高波浪で生じた海底の侵食が考えられた。
- (14)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・生育数は順調に増加し、花枝も確認され、造成したアマモ場が永続的に存続する可能性が示された。
- (15)この造成アマモ場は、造成後4年程度経過して生育密度と平均葉長が周辺の天然アマモ場とほぼ同じように生長し、10年近くが経過した現在も群落を維持している。
- (16)造成アマモ場および天然アマモ場は経年的に生育密度が減少する場合があります、その原因のひとつに台風や冬期の高波浪の影響が認められる場合もあるが、原因が特定できない場合もあった。

第4章では、効率良くアマモ場造成を実施する為には、アマモ場造成の対象海域の各種条件を予め検討して造成適地を選定する必要があると考え、3次元海浜変形計算法を用いたアマモ場造成適地の評価手法を構築し、アマモ場造成を実施した東播海岸谷八木地区に適用して検証した結果について述べた。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) エネルギー平衡方程式による平面波浪場計算、ラディエーション応力を外力とする運動方程式と連続式による海浜流計算、局所漂砂量モデルと漂砂の連続式による地形変化計算の3モデルからなる3次元海浜変形計算法を構築した。
- (2) アマモが存在し得るか否かの判定指標には、根の張り具合に応じ、アマモの成長速度に比較して短時間に発生する侵食量が直接のアマモの株の流出につながるとして地形変化速度を、加えて、正味の漂砂量が小さくてもシートフロー状に激しく底質が移動を繰り返せばアマモの流失につながると考え、底質の移動形態における各状態の遷移条件を表すシールズ数を併用した。
- (3) 評価の対象とした波浪条件は、東播海岸谷八木地区に敷設した播種シートのすぐ沖側で計測した現地波浪観測結果に基づき、冬期の最大波程度として $H_{1/3}=1.4\text{m}$ 、 $T_{1/3}=6.0\text{s}$ 、波向き SW を、また播種シート敷設後のアマモ株の減耗に影響したと考えられた $H_{1/3}=0.8\text{m}$ 、 $T_{1/3}=5.0\text{s}$ 、波向き SW を比較的よく来襲する冬期高波浪として対象とした。
- (4) 波浪場計算の結果、離岸堤背後に敷設した $5\text{m}\times 5\text{m}$ の播種シートの位置での有義波高は、冬期最大波および冬期に比較的良く来襲する高波浪(冬期高波浪)に対して、ともに $0.2\sim 0.4\text{m}$ 程度であった。
- (5) 海浜流計算の結果、2つの突堤に挟まれた海浜の汀線付近の水深が 3m 以浅の領域で、東側の突堤に向かう沿岸流が計算された。この沿岸流は、既往の研究で明らかとされている当海岸の沿岸漂砂の方向と一致した。
- (6) シールズ数の算定結果から、当該海域でアマモが多く自生している離岸堤背後の領域におけるシールズ数は、来襲波浪によらず 0.2 以下であったことから、この海域ではシー

ルズ数が常に 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た。

- (7) アマモの発芽・生育数が順調に増加した 5m×5m の播種シートを敷設した離岸堤端部背面でのシールズ数は来襲波浪によらず 0.5 前後であるのに対し、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シールズ数は 0.8 から 2 程度とかなり大きかった。
- (8) 地形変化計算の結果、アマモが多く自生している離岸堤背後の地形は安定していた。
- (9) 地形変化計算の結果、離岸堤端部背後の 5m×5m の播種シート敷設位置は侵食域であり、アマモが自生していなかった理由の一つと考えられた。この領域でアマモが群落を形成したことは、播種シートが地形変化に対する環境緩和策として有効であることを示した。
- (10) アマモの生長に必要な光を左右する水深とシールズ数および地形変化速度を評価項目として当海岸を評価したところ、この海域のアマモの自生範囲は、波浪条件に関わらず、水深を 2～3m(潮位を含まず)、シールズ数 0.2 以下、地形変化速度 1cm/hr 以下の条件で推定可能と考えられた。
- (11) この東播海岸においては、播種シートのアマモの生育に対する環境緩和効果を加味して、播種シートの敷設適地すなわち播種シートによるアマモ場造成適地は、水深を 2～3m(潮位を含まず)、シールズ数 0.5 ないし 0.7 以下、地形変化速度 3cm/hr 以下の条件を満たす領域であると考えられた。
- (12) 他の海域に本評価手法を適用する場合、東播海岸を対象に得られた条件と似た値が設定可能と予測されるが、対象海域にアマモ場が自生している場合はそれらの生育範囲を用いてシールズ数等の制限値を検証することが望ましいと考えられた。

第 5 章では、かつては広くアマモ場が存在したが、現在では沿岸の開発などにより消失した海域を対象に、前章で示した造成適地の評価手法を適用して実施海域を選定し、その上で播種シート工法を適用してアマモ場消失海域でのアマモ場再生の可否を検証した結果について述べた。さらに、従来アマモ場が存在しなかった海域でのアマモ場創出の試みとして、港湾域に新設された人工干潟の浅海部でアマモ場造成を試みた結果について述べた。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) りんくうタウン海域のうち樽井サザンビーチの東側および田尻漁港南西側の人工海浜前面の 2 海域に、事前に 3 次元海浜変形計算を用いたアマモ場の造成適地評価手法を適用して、試験実施の可否について検討した。
- (2) 神戸港の波浪観測データに基づき設定した激浪時諸元と冬期波浪時諸元を用いた検討の結果、樽井サザンビーチの東側では対象区域内の突堤付近に激浪時と冬期波浪時の造成適地が重なって分布しており、アマモ場造成にとって有望であると判断された。一方、田尻漁港南西側の人工海浜前面は、冬期波浪時には適地があるが、激浪時には適地が存在しないことから、アマモ場造成にとっては厳しい海域であると判断された。

- (3) 2003年12月に樽井サザンビーチの東側の造成適地と判定された区域に播種シートを敷設し、また室内で生産した幼苗を移植したところ、敷設後5年以上が経過した2009年5月の時点でも良好なアマモ群落を形成・維持している。
- (4) この樽井サザンビーチにおけるアマモ場造成事例は、アマモ場が衰退してしまった海域でも、適切な海域を選定すれば、アマモ場造成は可能であることを実証したものである。同時に数値計算による造成候補地の事前評価の有効性が示された。
- (5) 水深が10m前後と深い港湾域に新たに造成された阪南2区人工干潟の前面の浅場でアマモ場の創出を試みたところ、1年以上群落を維持はしたが、その後消滅した。
- (6) その原因として、水深が1.5m(底質は覆砂施工済み)と浅い場では競合生物であるアオサの大繁殖による光の阻害が推測された。また、夏の高水温の影響も考えられた。
- (7) 水深が約3mの粘性土地盤上では、継続的に存在する底層の濁りによる光環境の悪化が原因であると推測された。これには、人工干潟周辺で継続中の埋立工事(土砂投入)による濁りの影響も含まれると考えられた。
- (8) 阪南2区人工干潟前面でのアマモ場造成結果より、港湾域に造成された浅場でも、アマモの生育に必要な光環境が確保できればアマモ場を維持できることが示唆された。ただし、アマモ場造成においてアオサとの競合は大きな課題である。
- (9) アマモ場が衰退してしまった海域でアマモ場を再生させる、あるいは従来アマモ場が存在しなかった海域で新たにアマモ場を創出させるには、ある程度透明度がよい海域で人工海浜の前面のように浅場が形成され、かつ構造物などにより波が遮蔽されるといった人為的に環境が整備された場所を選ぶとともに、播種法では確実にアマモの種子を固定することが重要である。この点、ここで検証してきた播種シートによるアマモ場造成法は非常に有効なツールであることが実証された。

以上、播種シートによるアマモ場造成法と造成適地の評価手法およびそれらを用いて継続的に安定して存在するアマモ場を造成した事例について述べてきた。播種シートにより造成したアマモ場が継続的に安定して存在し得ることを実証したこの約10年の間には、社会情勢の変化もあって、アマモ場造成の主体が漁業協同組合やNPO、市民との協働に移り、比較的小規模でのアマモ場再生への取り組みが主流となった。その結果、播種シートによるアマモ場造成法の開発コンセプトであった大規模機械化施工は活かす機会を得られないでいる。しかしながら、小規模であれば播種シートの製作は参加者の手作りとなってアマモ場再生活動への参加者の一体感、充足感を養うことの一助になっていることと期待され、本工法とその有効性を社会に提供できたことは望外の喜びである。

一方で、このように効率よくアマモ場を造成できる播種シート工法にも更なる改良の余地はある。この播種シートには、アマモの根の生長や海域環境に対する影響を考え、主要素材に生分解性不織布と自然素材であるヤシ繊維からなるヤシマットを使用している。この播種シートを実海域で使用した場合、生分解性不織布は数ヶ月といった短期間で分解さ

れ消失したが、底質中に埋もれたヤシマットは何年にも渡って分解されないでその形状を保っていることが確認された。そのヤシマット上でアマモが群落を形成し続けていることから、アマモの生育上、このヤシマットが残っていることは何ら問題ないと判断されるが、底質中に生息する底生生物を考えた場合は、その行動を阻害するなどの悪影響が懸念される。したがって、より短期間で確実に分解される素材への変更が今後の検討課題といえる。より適した素材への変更が出来ないまでも、大きな播種シートを敷設する、あるいは複数の播種シートを隙間なく敷き詰めるのではなく、比較的小さな播種シートを千鳥に配置するなどして、底生生物に与えるヤシマットの影響を軽減することは可能であると考えられ、こうした播種シートの配置も検討すべき課題である。更には、提案した造成適地の評価手法は、適用海域が限られており十分に汎用的であるとは言い難い。今後様々な海域へ適用することを含めて、より良いアマモ場造成技術の向上に努めていきたい。

本研究の成果が、今後もアマモ場造成による海域環境の改善・生物多様性の維持に寄与できれば幸いである。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々にご教授とご支援ご協力をいただきました。ここに厚く、御礼申し上げます。

本論文を取りまとめる機会を与えてくださいました大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授出口一郎博士におかれましては、終始懇切丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました。深く感謝の意を表するとともに心より御礼申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授西田修三博士、同准教授荒木進歩博士におかれましては、本論文をまとめるにあたり有益なご指導、ご助言をいただきました。御礼申し上げますとともに深く感謝いたします。

愛媛大学大学院理工学研究科教授伊福 誠博士におかれましては、著者の卒業論文をご指導くださってから現在に至るまで、終始変わらぬご指導と叱咤激励を賜りました。海岸工学の魅力と研究に対する姿勢を学ばせていただいたとともに、この度も貴重なご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

東播海岸でのアマモ場造成では地元江井ヶ島漁業協同組合の皆様、また、りんくうタウン海域でのアマモ場造成では北中通漁業協同組合、泉佐野漁業協同組合、田尻漁業協同組合、岡田浦漁業協同組合、樽井漁業協同組合の皆様には格別のご配慮とご協力を賜りました。皆様のお力添えがなければ本成果は得られませんでした。厚く御礼申し上げます。

大阪府港湾局が整備されました阪南 2 区人工干潟でのアマモ場造成は、国土交通省国土技術政策総合研究所が中心となった官学民の共同研究、都市臨海部に干潟を取り戻すプロジェクトの一環として行えました。国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部海洋環境研究室長古川恵太博士はじめ関係者の方々にご高配賜りましたこと、厚く御礼申し上げます。

モリエコロジー(株)森 鐘一博士におかれましては、生物学的な見地からアマモに関するご指導とご支援を賜りました。また、同社熊谷明生氏には長年にわたる現地調査を一手に引き受けていただき、的確なご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

東洋建設(株)取締役執行役員副社長土木事業本部・総合技術研究所管掌前田正孝氏、同じく東洋建設(株)顧問井戸真一氏、同じく東洋建設(株)執行役員総合技術研究所長兼鳴尾研究所長三宅達夫博士におかれましては、厳しい社会情勢の中、学位取得の機会を与えていただきました。また、常に暖かい励ましと懇切丁寧なご指導を賜りました。ここに深く感謝い

たします。

東洋建設(株)土木事業本部営業第一部部長稲田 勉氏, 東洋建設(株)大阪本店土木部南大阪出張所長多賀 博氏, 同じく東洋建設(株)大阪本店の方々には現地でのアマモ場造成実施において格別のご尽力を賜りました。特に稲田 勉氏には, 播種シート工法を全国各地に広めていただきました。また, 東洋建設(株)の山崎智弘博士(現名古屋支店), 同じく長山英樹氏(現九州支店)には, アマモ場造成適地評価手法の開発において, 有意義な議論と多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

東洋建設(株)鳴尾研究所の方々におかれましては, 日々の業務が繁忙を極める中, 並々ならぬご協力を頂きました。深く感謝いたします。

さらに, 元東洋建設(株)鳴尾研究所水域環境研究室長芳田利春氏におかれましては, 著者が本研究を遂行する直接のきっかけを頂きました。また, ご在職中はもとより, 東洋建設(株)をご退職後も, 常に暖かい励ましと懇切丁寧なご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

最後に, ここまで私を励まし支えてくれた両親と妻と 2 人の娘に感謝します。