

瀬戸内海浅海域におけるアマモ場造成技術に関する研究

藤原宗弘

Research on Appropriate Creation Technology for *Zostera* Beds in and around the Coastal Shallow Areas, Seto-Inland Sea

Munehiro FUJIWARA

Zostera marina is a general sea grass that can be observed in the Seto Inland Sea, Japan. *Zostera* beds have important functions as water purification, spawning and nursery grounds for valuable marine resources. However, the area of *Zostera* beds in Kagawa sea area was about 9,000 ha in 1945 and decreased to 900 ha, one tenth of 1945, in 1996, over the past five decades. One of the causes of the *Zostera* beds reduction was reclamation of coastal sea area in Kagawa for industrial ground. Coastal shallow area, such as sea grass bed and tidal flat was the best site for reclamation. Therefore, the land suitable for *Zostera marina* was almost reclaimed and it became urgent to create *Zostera* beds for restoration of coastal environment in the Seto Inland Sea. From these reasons, a dozen fisheries research institutes around the Seto Inland Sea have been conducting planting experiments of *Zostera* beds in various coastal areas for over 30 years. Kagawa Prefectural Fisheries Experimental Station has conducted planting experiments of *Zostera* beds in Kagawa sea area since 1983. However, there are few successful outcomes in spite of their strong efforts.

The coastal area in Tsuda bay that is located at the eastern part of the Seto Inland Sea, Sanuki city of Kagawa Prefecture, was chosen for research area by following reasons. Detached breakwaters were constructed off the exiting breakwater from 1989 to 1997 in this bay. In most cases *Zostera marina* had been lost during the past research by the strong westerly wind waves at the research site in winter. Therefore, the calm back area of detached breakwater was chosen as a research site where wave height and energy can be controlled in order to acquire necessary technical information for *Zostera* beds creation in this area.

In this study, to develop a new creation technology for *Zostera marina* beds, I conducted the evaluation and analysis of *Zostera marina* growth factors using the Self Organization Future Map (SOM) that is a kind of neural network computer program and three dimensional numerical simulations. These calculations take the complicated relationship between changes of marine environmental condition and *Zostera marina* growth factor into consideration. The results of field research were applied to those methods. Also, to select the appropriate area to create *Zostera* beds, I examined the effect of current field around detached breakwaters against *Zostera* beds rootage using numerical simulations.

As a result of this study, an artificially created *Zostera* beds was created behind the detached breakwater where wave height and energy was reduced. It was confirmed that the growth of seeded or transferred beds was observed there and the bed was rooted and its area had expanded through yearly fluctuations. The appropriate growth conditions for the *Zostera* beds were examined by field survey on the characteristics of growth, maturation and horizontal distribution in the developed area. It would be advanced information for restoration of *Zostera marina* growth and also the effective approach for the *Zostera* beds construction.

キーワード : アマモ, アマモ場造成, 生活史, SOM, アマモ長期変動, 数値シミュレーション

第1章 序論

1.1 研究背景

瀬戸内海は、世界にも類を見ない多島美を誇る海域であり、温暖少雨の気候と豊かな自然に恵まれ、古くから多くの人々はその恩恵を享受してきた。現在、500種を超える魚類が生息し、そのうち200種近くが漁業や遊漁の対象とされている¹²⁾。このような生物多様性を支えているのは、陸域からもたらされる豊富な栄養塩や、瀬戸部や灘部が交互に存在し、干満差が大きく潮流が速いといった島々が形作る瀬戸内海の多様な環境にある³⁾。とりわけ、浅海域に多く分布する藻場や干潟などは、生物にとっての直接的な生活空間として利用される以外にも、有用魚貝類の産卵場や幼稚魚の保護生育場の提供⁴⁾、さらには、微生物、貝類などの底棲生物による濾過作用⁵⁾、有機栄養塩の吸収などによる水質浄化機能⁶⁾をもち、生態系、生物環境を維持するための重要な役割を担っている。また、藻場を構成する海藻・海草は、季節的な消長を繰り返して枯死流出すると、海面を漂う流れ藻⁷⁾となる。そこはサンマ、サヨリ、トビウオ類の産卵基質として利用されるだけでなく、メバル、クロソイ、モジャコ（ブリの稚魚）等が发育段階の一時期を随伴しながら過ごすなど、水産資源にとって重要な役割を果たしている^{8,9)}。

日本沿岸域における藻場・干潟面積については、環境省が自然環境の現状と時系列変化を捉えることを目的に「自然環境保全基礎調査」¹⁰⁻¹³⁾として、全国の藻場・干潟をはじめとする生物生息環境の変化を把握する調査（全国一律で統一的な手法を採用しているが、各年を比較すると基準は統一されていない）を1978年、1989年、1996年と実施している。図1.1～図1.3に示すように、全国的にみても過去50年以上にわたって藻場・干潟面積は減少しており、瀬戸内海でも多くの藻場・干潟が消失していった¹⁴⁻¹⁷⁾。戦前に10,000ha程度あったとされる香川県海域のアマモ場面積も、高度成長期に水質の悪化や浅海域の埋め立てが盛んに行われたため減少してしまい、1996年の調査では891haしか確認されていない。

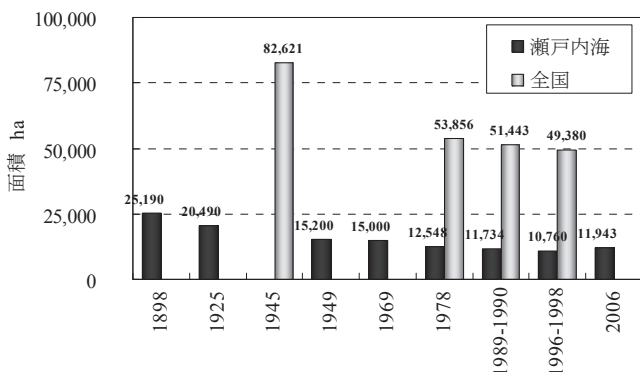


図 1.1 瀬戸内海と全国における干潟面積の推移

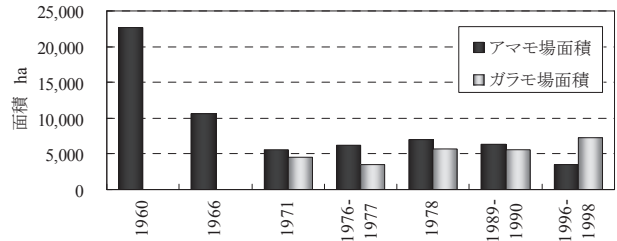


図 1.2 瀬戸内海における各種藻場面積の推移

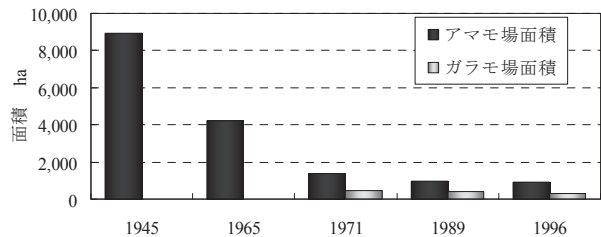


図 1.3 香川県における各種藻場面積の推移

この干潟や藻場の消失の主な原因は、高度経済成長期における沿岸域の自然環境の消失にあり、高度経済成長期の瀬戸内海では、沿岸域の開発行為により浅海域の埋立て¹⁸⁾が各地先で行われた。また、工業化・都市化に伴った産業排水・工業排水などの流入負荷の増加や航路確保のための海底浚渫、建設材料である海砂の採取¹⁹⁾が頻繁に行われた。これらがきっかけとなり連鎖的に環境が悪化し、干潟・藻場の消失、さらには水質汚染、赤潮や貧酸素水塊が発生するようになった。これらは、生物の生息環境にも大きな影響を与えているものと懸念されており、現在では、直接的な影響は明らかにはなっていないものの漁業生産量の減少という問題が起こっている^{20,21)}（図1.4）。20世紀に入ってからのアマモ場を含めた藻場の分布状況は、世界的にみても同様の減少傾向が認められる²²⁾。

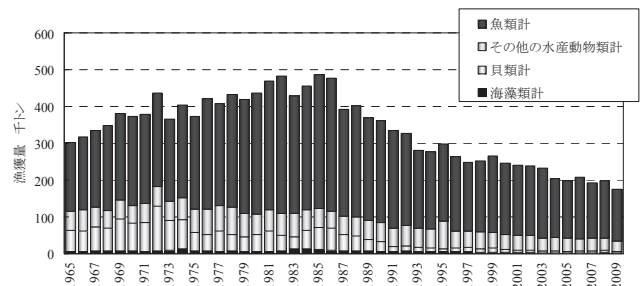


図 1.4 瀬戸内海における漁業生産量の推移

このような背景をうけ、日本政府は瀬戸内海を改善させる目的で、1973年に瀬戸内海環境保全臨時措置法（後に特別措置法と改称された、いわゆる瀬戸内法）、「瀬戸内海環境保全基本計画」（1978年）などの各種法

制度・計画等の施策を講じてきた。しかし、一度人の手がかわって破壊された海域（特に浅海域）はなかなか以前のようには回復していない。最近になって計画された「瀬戸内海環境修復計画」（2005年2月）では、「今後20年間で昭和1975年以降に失われた藻場・干潟等の約6割の面積を修復する」ことを目標とし、これまでの流入負荷削減を中心とした政策から、藻場・干潟の再生・保全等、従来の海域が有していた機能の回復、ならびに海洋の総合的な管理に目が向けられつつある。しかしながら藻場・干潟の再生適地の減少など、解決しなければならない課題が多く、いまだ大きな改善には至っていないのが現状である。

また、別の考え方をすれば、この漁業生産量の減少は藻場の消失だけが原因ではなく、瀬戸内法による総量規制の導入など過剰な水質改善も原因のひとつとして捉えることができる。海域の生態系の底辺層は植物プランクトンであるが、その植物プランクトンの栄養源は陸上植物と同じ栄養塩類（窒素、リン）である。現在、この栄養塩類の不足により、瀬戸内海全域で冬季の養殖ノリの色落ち被害による生産量の減少が大きな社会問題となっている^{23,24}。アマモもノリも同じ海域に生育する植物であり、その栄養源は海水中に含まれているDIN（溶存無機態窒素）である²⁵⁻²⁷。そのDINが減少することでアマモが生育しにくい環境になっていることも想定される。現在、水質の改善により、海域の透明度が徐々によくなり、アマモの分布域は水深のある沖合方向に徐々に拡大しつつあるが、アマモ場が拡大することで、アマモ場にトラップされるN（窒素）量も多くなり、徐々に生態系が太く大きくなり、以前のような豊かな海になることを期待したい。

1.2 研究目的および既往の研究

わが国の沿岸域には、古くから多種多様な藻場が分布している。藻場は海洋生物の生産活動・生活の場を提供するほか、水質浄化機能を有し、豊かな生物生息環境を形成している。また、藻場は人間にとっても漁業を通じて有用な水域環境として認識されており、沿岸生態系の中でも重要な役割を果たしている。

ところが1960年半ばから海域環境が急速に悪化し、瀬戸内海では、藻場・干潟の消失、水質悪化、赤潮・貧酸素水塊等の発生等から、有用水産生物等の生育環境・生息場への影響が指摘されるようになった。特に瀬戸内海の藻場・干潟面積減少は著しく、過去50年間でアマモ場の8割程度、干潟の2割程度が消失している（図1.2, 図1.3）。

このような背景から、瀬戸内関係府県では、藻場・干潟の再生を目指した様々な試験・研究が行われている²⁸⁻³¹。香川県では、1995、1996年度に沿岸漁業整備開発

基礎調査（現水産基盤整備事業）で岩礁域に分布するガラモ（ホンダワラ類）を増殖させるガラモ場造成に関する本格的な調査³²が実施され、1997年度から本格的にガラモ場造成事業が始まった。その一方で、砂泥域に生息するアマモについては、1983年度から1993年度まで香川県西部の三豊海域で漁業者とともにアマモ場造成に関する試験研究³³が行なわれ、1995年からは、さぬき市津田地先³⁴で行われ現在に至っている。

アマモの基本的な生育条件は、静穏な浅海域で底質が砂泥地であること、生育に十分な光量が届くこと、水質が清浄であること等が挙げられ、このような条件に適した沿岸域は、埋立て、港湾・防災施設建設、護岸工事により激減している。また、アマモの生育に適した水深帯でも台風や季節風によって砂が移動してしまう場所であったり、海底の底質がアマモの生育に適さない場所が多く残ったりしており、アマモの生育環境に適した場所自体が減少しているのが現状である。これらのことから環境改善を行わないアマモ場造成試験では結果が伴わないことが多く、香川県で行われたアマモ場造成試験では「播種・移植」を行っても1、2年でアマモ場が消失してしまう場所が多く、試行錯誤が繰り返されてきた。現在では、恒常的に静穏域が形成されていることや波浪抑制による砂面変動が小さいことから、冬季季節風の強い海域では消波離岸堤のような海岸構造物の背後域がアマモの生育環境として期待され、アマモ場造成試験が行われている。

特に近年の瀬戸内海のアマモ場造成に関する研究は、「瀬戸内海におけるアマモ場造成の実践事例」³⁵として、瀬戸内海で行われたアマモ場造成事業の各種モニタリング結果を総括している。平岡ら³⁶の研究では、広島県下蒲刈島大地地先の防波堤建設が進む海域において、防波堤建設による波浪抑制とアマモ移植とがアマモ場形成へ与える効果を潮流・波浪計算、実海域における砂面変動、底泥の粒度組成、アマモの生育状況から評価を行っている。この結果、防波堤建設前は、底質がアマモの生育環境に適さず、アマモ種子が移植区域へ運搬される水理条件になかったが、防波堤建設後は、波浪抑制と砂面変動の低下によってアマモ場の生育環境が形成されたこと、移植したアマモが種子供給源として機能したことが推定され、実際にアマモの分布面積は、移植後約2年で移植時の2倍以上となった。このように海岸構造物背後域でのアマモ場生育環境の形成が確認されている。

また、本研究の対象地でもあるさぬき市津田湾の消波離岸堤背後域の造成アマモ場に関しては、香川県水産試験場の藤原ら³⁷がモニタリング結果を報告している。このような既存の消波離岸堤周辺でアマモ場造成が行われた事例は少なく、今後のアマモ場造成事業の対象地として期待されている。

いずれの事例においても対象海域におけるアマモの生育を制限する要因を把握し、その条件の緩和を行うことで造成試験を実施していた。瀬戸内海における主な緩和対策として、生育基盤の嵩上げによる光量確保が多い傾向が認められた。これは瀬戸内海全域の浅海域が埋め立てられてしまいアマモの生育に適した水深帯が減少してしまったことに加えて、主に瀬戸内海北部の底質は泥分が多く、濁りによる光量減少がアマモの生育に大きな影響を与えていることが考えられる。瀬戸内海南部（四国側）の香川県海域の比較的大きな閉鎖性湾内でも同様の条件がみられ、あわせて沖合方向に開いている海岸線では、冬季の北西からの季節風による波浪の影響が大きく、それによる砂面変動がアマモの生育に大きな影響を与えている場所も多い。これらのことから様々なアマモ生育環境を考慮できる香川県海域を研究対象海域とした。

アマモの生育制限要因の中で影響度の高いものとしては、光量、波浪、砂面変動、次に水温、底質、塩分等が挙げられ、特に光量・波浪が大きな要因となっている。光量に関しては、その海域の水質環境に依存するところが大きく、本研究の対象海域のひとつであるさぬき市津田湾は1996～2002年度に播種・移植を行った造成試験後、12年以上にわたってアマモの生育が確認されていることから、光量に関してはアマモに適した生育環境下にあるといえる。しかしながら、この海域では、アマモ場の拡大が緩やかであり、部分的に衰退している場所も確認されているため、波浪・潮流が消波離岸堤周辺のアマモ場に与える影響を評価した研究は少ないことから、消波離岸堤周辺における潮流による流動場を把握することにより、静穏域を維持できる場所が特定できれば、今後のアマモの生育場拡大につながる一つの指標として評価できるものと考えられた。

そこで本研究では、香川県海域のアマモ場の生理生態学的な特徴を把握し、アマモ生育環境要因について、個々の取り扱いではなく、複雑な環境条件の相互関連性を評価した。また、消波離岸堤周辺の流動場がアマモ場にあたる影響を数値シミュレーションモデルおよび現地観測結果を用いて解析・評価し、今後の生育場拡大に向けた検討を行うことを目的とする。

1.3 研究概要

香川県においてもアマモ場は、沿岸漁業と深い関わりあいがあり、自治体や漁業関係者らによるアマモ場の現状把握のための現地調査やアマモ場の修復・造成研究が進められているものの、瀬戸内海におけるアマモの現存量やアマモの季節変化に関するデータに乏しく、未だ有効な技術開発には至っていない。また、アマモの生育環境要因については、様々な調査・研究が進められ、個々の制限要因の限界値が推定されている。現在のアマモ場

造成手法は、それらの制限要因条件を緩和・改善する技術として開発されているが、現在でも人工的な手法によるアマモ場造成によって安定したアマモ場が造成・維持されている事例は多くはない。これは、アマモの生育環境要因が複雑かつ複合的に作用していることが原因と考えられ、現在のアマモ造成手法がその対策として最適であるかどうか検討を行う必要があることを示唆している。

本研究では、これらのアマモ場のモニタリングから得られた生態的な特徴を踏まえて、アマモ生育環境要因について、個々の取り扱いではなく、複雑な環境条件の相互関連性を評価・検討することを目的に、対象海域の環境調査により、海域の物理、生物環境に関するデータを蓄積し、その結果をSOM（自己組織化マップ）および数値シミュレーションモデルに適用しながら、新たなアマモ場造成技術を検討した。また、消波離岸堤周辺の流動場がアマモ場にあたる影響を数値シミュレーションモデルおよび現地観測結果を用いて解析・評価し、アマモ場造成適地選定技術の開発と造成方法について検討を行う。

本論文では、これまで有効なアマモ場造成技術が少なく、対象海域の特性に応じたアマモ場造成技術が求められる中で、アマモ群落の特徴を現地観測および数値モデルにより把握し、対象海域の環境条件に即した、より高度なアマモ場回復および造成技術を開発するための有用な知見を得ることができた。

本論文は、以下の6章により構成される。

第1章では、序論として、アマモ場造成に関する研究背景、研究目的および既往の研究の整理を行った。

第2章では、藻場の種類とアマモの特徴を整理し、海藻であるアマモの分布状況およびこれまで不明であった天然アマモ群落の現存量とアマモの季節変化を把握し、生態的特性の検討から、環境の異なる海域に応じたアマモ場造成技術を開発するための評価項目を検討した。

第3章では、香川県における代表的な半閉鎖性内湾である高松市屋島湾を対象海域として、湾内のアマモ生息場と対照区のアマモが生息していない場所の海域環境について現地調査を行ない、各々の海域環境データの比較・検討を行うと共に、SOM（自己組織化マップ）による環境要因データの特性・関連性について分析・評価した。

第4章では、消波離岸堤が建設されているさぬき市津田湾海域を対象として、離岸堤背後域に播種・移植したアマモの生長の長期変動をモニタリングし、アマモの生育制限要因の特定を行い、離岸堤背後域に形成される静穏域の特徴を把握し、波浪および離岸堤背後域に発生する回折波による循環流の影響が、アマモの生育に重要な影響を及ぼすことを指摘した。

第5章では、第4章で指摘した離岸堤背後域の流動環

境について、3次元マルチレベルモデルを用いた潮流計算を行い、数値計算による波浪解析の研究で多く用いられているオイラー・ラグランジュ法によりアマモ種子（花穂を含む）の移送状況を定量的に評価した。従来のモデルでは対象領域における構造物と海洋との境が極端であり、本研究のような狭い対象海域では精度の高い潮流解析を行うことができなかったが、対象海域の詳細な地形データ、消波離岸堤の形状・規模を把握することで、より正確な対象海域の地形モデルを作成し、計算時間間隔を従来の1/10にすることで、より精度の高い解析を行った。その結果、消波離岸堤背後域や離岸堤間を含む対象海域の流動環境とアマモ種子の分布状況およびアマモ種子滞留率との関係を明らかにし、消波離岸堤背後域がアマモ場造成に適した場所であることを解明した。

第6章では、結論として研究成果のとりまとめを行う中から、今後のアマモ場造成における課題、新たな技術開発例とその展望を述べている。

参考文献 <第1章>

- 1) 瀬戸内海水産開発協議会：1997, 瀬戸内のさかな. 瀬戸内海水産開発協議会, 広島, 97pp.
- 2) 香川県農政水産部水産課・香川県水産試験場：2004, 香川の魚. 香川県農政水産部水産課・香川県水産試験場, 高松, 115pp.
- 3) Environmental Conservation of the Seto Inland Sea, International EMECS Center: 2008, Sustainable Development in the Seto Inland Sea, Japan (Okaichi, T. and Yanagi, T. eds.). Tokyo, Terra Scientific Publishing Company(1997).
- 4) 小路淳：2009, 藻場とさかな—魚類生産学入門—. 成山堂書店, 東京都, 178pp.
- 5) Fonseca, M.S., J.S. Fisher: 1986, A comparison of canopy friction and sediment movement between four species of seagrass with reference to their ecology and restration. *Mar.Ecol.Prog.Ser.*, 29, 15-22.
- 6) Hemminga, M.A., P.J. Harrison, F.van Lent : 1991, The balance of nutrient losses and gains in seagrass meadows. *Mar.Ecol.Prog.Ser.*, 71, 85-96.
- 7) 山本昌幸・藤原宗弘・山賀賢一・榎野元秀：2002, 瀬戸内海中央部における流れ藻の構成種. *水産増殖*, 50, 375-376.
- 8) 山本昌幸・榎野元秀・藤原宗弘・山賀賢一：2002, 瀬戸内海中央部の流れ藻に随伴する幼稚魚. *日水誌*, 68(3), 362-367.
- 9) 千田哲資：1965, 流れ藻の水産的効用, *水産研究叢書*
13. 日本水産資源保護協会, 東京, 55pp.
- 10) 環境省：1980, 第2回自然環境保全基礎調査 海域調査報告書.
- 11) 環境省：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.
- 12) 環境省：1998, 第5回自然環境保全基礎調査 海辺調査データ編.
- 13) 生物多様性情報システム：自然環境保全基礎調査. <http://www.biodic.go.jp/J-IBIS.htm>
- 14) せとうちネット：藻場・干潟の状況. <http://www.seto.or.jp/seto/index.htm>
- 15) 瀬戸内海水産開発協議会：1967, 瀬戸内海域における藻場の現状. 21-38.
- 16) 南西海区水産研究所：1974, 瀬戸内海の藻場—昭和46年の現状—. 39pp.
- 17) 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書—藻場の分布—. 419pp.
- 18) 川崎 健・平野敏行・嶋津靖彦：1977, 海面埋め立てと環境変化. 恒星社厚生閣, 東京, 1-191.
- 19) 四国新聞社：2000, 新瀬戸内海論 連鎖の崩壊 (四国新聞社編). 四国新聞社, 高松, 16-84.
- 20) 中国四国農政局統計情報部編集：2006, 瀬戸内海区及び太平洋南区における漁業動向.
- 21) 農林水産省：統計情報, 海面漁業生産統計調査. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html.
- 22) Short, F.T., Wyllie-Echeverra, S.: 1996, Natural and human-induced disturbance of eelgrass. *Environment Conservation*, 23, 17-27.
- 23) 多田邦尚・藤原宗弘・本城凡夫：2010, 瀬戸内海の水質環境とノリ養殖. *分析化学*, 59(11), 945-955.
- 24) 藤原宗弘・松岡聡・山賀賢一・吉松定昭：2009, 香川県におけるノリ養殖生産の現状と問題点. *香水試研報*, 10, 17-24.
- 25) N.A.Campbell, J.B.Reece: 2007, キャンベール生物学. 小林興監訳, 丸善株式会社, 東京, 1494pp.
- 26) Lobban, C.S. and P.J. Harrison : 1994, *Seaweed Ecology and Physiology*. New York, Cambridge University Press.
- 27) 藤原宗弘：2011, ノリの栄養塩取り込み—ノリは間欠的な栄養塩供給を利用できるか—. *日水誌* 77(1), 113.
- 28) 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*, 42(1), 75-78.
- 29) Morita K : 2000, Restoration of Eelgrass Bed. *Environmental Sciences*, 7(3), 159-164.
- 30) 春日井康夫・久本忠則・中山康二・松本英雄：2003,

広島県尾道糸崎港における干潟再生事業. 海洋開発論文集, 19, 107-112.

- 31) 棚田教生・和泉安洋・團昭紀・広澤晃・森口朗彦・寺脇利信：2005, 冬季波浪条件の比較的厳しい海域におけるガーゼ・礫製マットによるアマモ繁茂への効果と限界. 水産工学, 42(2), 129-134.
- 32) 香川県：1997, 沿岸漁場整備開発基礎調査（香川県三豊地区）報告書. 136pp.
- 33) 下川千代照：1994, 燈灘海域におけるアマモ場造成試験の総括. 平成6年度南西海ブロック藻類研究会誌第14号, 48-55.
- 34) 藤原宗弘：2009, 藻場造成技術高度化試験. 平成19年度香水試事報, 56-58.
- 35) 寺脇利信・島谷学・森口朗彦：2005, 瀬戸内海におけるアマモ場造成の実践事例. 水産工学, 42(2), 151-157.
- 36) 平岡喜代典・杉本憲司・玉置仁・寺脇利信・岡田光正：2003, 防波堤建設による環境変化と移植アマモ場の拡大. 水環境学会誌, 26, 849-854.
- 37) 藤原宗弘・山賀賢一・吉田吾郎・寺脇利信：2006, 離岸堤背後域での播種アマモの長期変動. 水産工学, 43(2), 173-177.

第2章 藻場の種類と香川県に分布するアマモの特徴

2.1 藻場とは

藻場とは、沿岸浅海域において、大型の海藻類もしくは海草類が繁茂し、群落が発達した場所のことで、群落を構成している主要植物種によって分類される¹⁾(図2.1)。主なものとしては、種子植物であるアマモ (*Zostera marina*)、コアマモ (*Zostera japonica*)、ウミヒルモ (*Halophila ovalis*) などの海草 (sea grass) により形成されるアマモ (海草) 場²⁾と、藻類に分類されるホンダワラ、コンブ、ワカメといった海藻 (seaweed) により形成されるガラモ場やコンブ場とがある。海草とは、水中に生育する植物のうち陸上の植物と同様に維管束をもち、花を咲かせ、種子をつける植物のことであり、維管束をもたない植物を総称して藻類と称する³⁾。

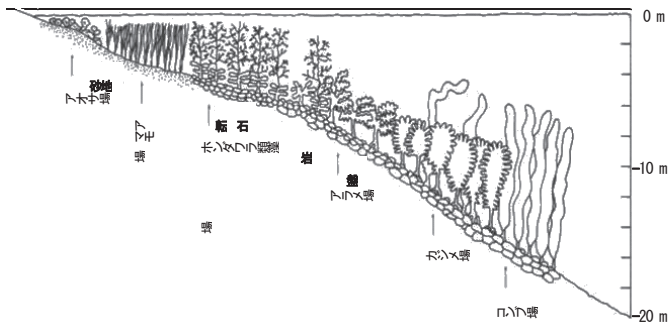


図2.1 藻場の垂直分布と底質¹⁾

藻場は、潮の流れを和らげるとともに浅海域の第一次生産を支え、多くの水産生物の産卵場や稚稚子の保護育成場、成体の摂食・生息場として生活空間を提供することから「海のゆりかご」⁴⁾と呼ばれている。我が国の藻場で稚稚仔魚期を過ごすことが知られている魚類は100種以上に及ぶ⁵⁾と推定されている。また、光合成による二酸化炭素の吸収、海棲生物への酸素供給に加えて、地下茎による底質の安定化、海水・底泥中の栄養塩を吸収する浄化機能などを有しており、「海の森」とも呼ばれる。

2.2 アマモとは

世界に分布する海草種は5科12属59種が確認されており、そのうちわが国では3科8属16種が知られている(表2.1)⁴⁾。ただし、海草類の分類については、分子系統学的な情報が近年多く発表されており、海草を構成する分類については現在確立していない状況といえる⁶⁾。2004~2006年度に水産庁が行った全国規模の海草類分布調査の結果では、瀬戸内海では3種が分布するとされ、香川県海域でもアマモ、コアマモ、ウミヒルモが確認された⁷⁾。最も面積が大きかったのはアマモ場で、アマモ場とは、海草類の中のアマモが優先して繁茂し、群落が形成されている場所のことを指し、わが国沿岸域、特に瀬

戸内海等の浅海域では、広範囲にわたって大規模な群落を形成している。

表2.1 日本に生息するアマモ類の種類⁴⁾

| 科名 | 属名 | 種名 |
|--------|------------|-----------|
| アマモ科 | アマモ属 | アマモ |
| | | コアマモ |
| | | タチアマモ |
| | | オオアマモ |
| | | スゲアマモ |
| | スガモ属 | スガモ |
| シオニラ科 | ウミジグサ属 | ウミジグサ |
| | | マツバウミジグサ |
| | ボウバアマモ属 | ボウバアマモ |
| | リュウキュウアマモ属 | リュウキュウアマモ |
| | | ベニアマモ |
| トチカガミ科 | ウミヒルモ属 | ウミヒルモ |
| | | ヒメウミヒルモ |
| | リュウキュウスガモ属 | リュウキュウスガモ |
| | ウミショウブ属 | ウミショウブ |

一般的に、アマモは静穏な内湾や浅海の砂泥底域に群落を形成する。アマモの分布南限は、8月の表面気温の27℃等温線が境界であるとされており、生育上限水温は8月の平均気温28℃と考えられている。生育水深の上限に関しては、主に干潮時の干出と、波浪や潮汐などの海水流動による砂面移動によって制限される。また、生育水深の下限は、海水中を透過してくる光量によって制限される⁸⁾。

アマモの生活史は、春先に草体(栄養株)の一部が花枝(生殖株)に変化し、春から初夏にかけて繁茂・成熟し、花枝の先端の花穂に種子がつくられる。その後、花枝が枯死し・流失する。特に、浮き上がり、海面を漂うものを流れ藻、浮き上がらずに海底を転がりながら移動・滞留するものを寄り藻という。流れ藻・寄り藻は、海岸への打ち上げ藻ともあわせ、生物にとっての食物や住み場となり、長期間かけて広範囲に広がっていく。海底に落ちた種子は夏季の高温期を泥中で過ごし、水温の下がる冬季に発芽し、冬から春にかけて生長する(図2.2⁹⁾、写真2.1~写真2.3)。また、この時期には地下茎が盛んに分枝を繰り返しながら、栄養繁殖を行う。このように、アマモの繁殖方法には、種子によるものと、地下茎の分枝による2通りがあるが、生育環境条件の違いにより繁殖方法が異なる。特に香川県で得られた種子を使用した造成試験では、発芽1年目のアマモは、栄養株として生育しほとんど花枝に変化しない。閉鎖性が強く夏季の最高気温が30℃を超えるような海域では越年する栄養株はみられず、1年で寿命を終えるものもある¹⁰⁻¹⁴⁾。しかし、

香川県海域でも 2004~2006 年度の全国規模の海草類の分布調査により、春先の花枝形成時に、周囲に栄養株がみられず、地下茎が伸張していない花枝のみの分布域を確認した¹⁵⁾。このときの調査では、他県でも単年生の特徴を持つアマモ群落が複数カ所確認されており、より注意深くアマモを観察することが重要であることが示された。

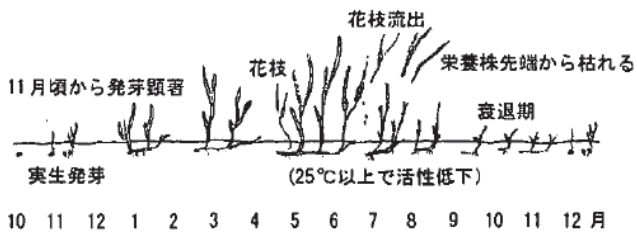


図 2.2 アマモの生活史⁹⁾



写真 2.1 アマモ場 (津田湾)

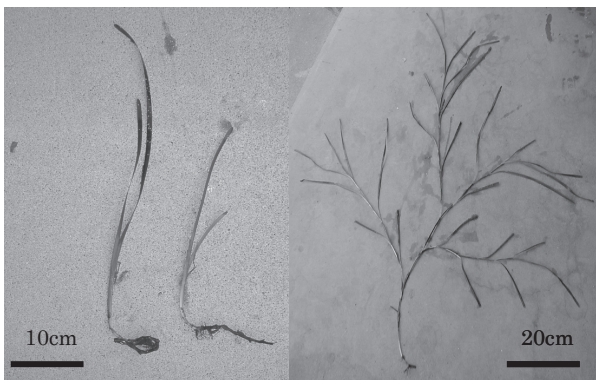


写真 2.2 アマモ (左: 栄養株, 右: 花枝)

アマモ種子に関しては、1粒当たり長径 3 mm 程度、短径 1.5mm 程度、湿重量 0.01 g 程度の大きさである。発芽後、草体は半年ほどで草丈 1 m 程度まで生長する(写真 2.4, 2.5)。多年生のアマモの場合は、1年目は花枝を形成しないが2年目以降に栄養株の2~3割程度が花枝に

変化し種子をつける。特に種子数の推定は難しく、種子が実る花枝は年によって草丈や花穂の量(ボリューム)がばらつくので、毎年測定が必要である。香川県水産試験場での観察¹⁵⁾では、香川県海域に分布する多年生アマモでは、花枝の草丈は 50cm~200cm と大きく差があり、花枝1本当たりの種子数も同様に 30粒~150粒と差があり、単年生と考えられるアマモでは 200粒を超えるものもあった。

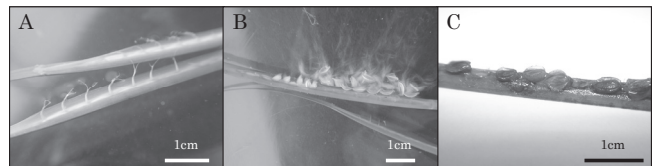


写真 2.3 アマモの花穂
(A: 雌花, B 雄花, 花穂上の成熟した種子)

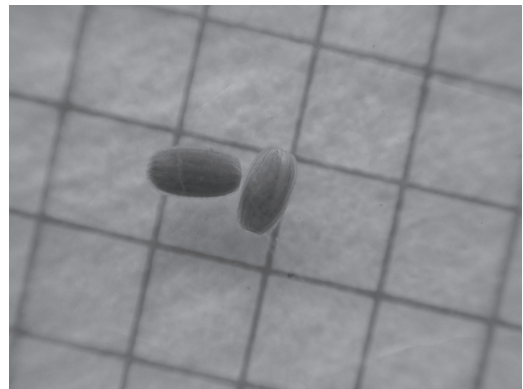


写真 2.4 アマモ種子 (5 mm 方眼)

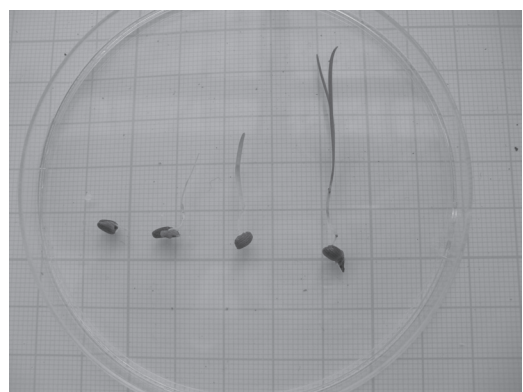


写真 2.5 アマモ種子の生長過程 (発芽~1週間程度)

2.3 アマモ場造成

藻場造成とは、藻場の生育環境を人工的に整備する作業のことであり、特にアマモを対象とした藻場造成のことをアマモ場造成という。アマモに適した環境を整えるといった大規模造成事業では、生育水深や光量を確保す

るために、まず地盤の改良を行う必要がある。一般的に、浚渫土などで海底面をかさ上げし、さらに表面をアマモの生育しやすい土砂で覆うことにより生育環境を改善する方法がとられる。このような海底地形の形状変更を行う手法を採用する場合には、周辺環境へ与える影響を評価する必要がある。また、浅海域において生育環境が整っている場所へ造成する方法としては、直播きやシート、マット等で間接的に種や苗を移植するような方法がとられる。

本研究の対象種でもあるアマモの再生法は、天然のアマモ場から栄養株を採取し、再生地の海底に植え付ける栄養株移植法、天然のアマモ場から花枝を採取し、さらに水槽で追熟させて種子を採取・管理し、冬季に種子を播く播種法、採取した種子を陸上で育苗させた後、海底に移植する苗移植法の3つに大別される。播種・移植技術を選定する際に最も配慮しなければならないことは、移植株の採取地において、株採取によるアマモ場に与える影響を最小限に留めることである。移植株採取地から十分な量の栄養株を確保できない場合は播種法を検討する。十分な量の栄養株を確保できる場合には、栄養株の活着が良好な時期の栄養株移植法も選定可能となる。また、アマモの形質・生態特性は生育場所の生育環境と密接な関係をもっており、同一海域内に生育するアマモ場でも、単年生と多年生アマモの混在や、群落間で大きな特徴の違いが見られることがあり、特に単年生アマモの発現機構については未解明な部分が多く、今後の研究がまたれる。

アマモ場造成事業は1980年代から積極的に行われてきたが、アマモの生育条件は周辺環境が複合的に関係しているため、成功事例が少ないというのが現状である。アマモ場造成に対する課題点としては、以下のことがあげられる。

- ・物理的流失に対する潮流、波浪の強度、底質などの関係の解明
- ・濁りの起源と移流拡散機構の解明
- ・アマモの生活史の各ステージにおける光要求量解明
- ・種子減耗の原因解明
- ・発芽、種子、栄養株の形成量を決定する支配要因の解明
- ・栄養株が健全な状態で存続するための最適条件の解明
- ・アマモ種子の人工採苗技術の確立

また、アマモ場造成試験の成否は、ほとんどが造成地の特長によって決まると考えられるため、造成地選定が特に重要となる。造成後の問題としては、近年、黒潮流域沿岸のアマモ場造成地では草食性魚類による食害が確認されており、今後温暖化の進行などにより海の環境が変化することで、現存するアマモ場が消失することも考えられる。香川県海域でも近年(1998年¹⁶⁾、2007年¹⁷⁾、

2010年、2011年)、漁獲量が減少していたアイゴ(*Siganus fuscescens*)幼魚が増加し、秋頃にアマモ場やガラモ場に蝟集し、アマモやホンダワラの新芽を食べ荒らす食害が発生している。したがって、造成後も継続的なモニタリングが必要であるとともに、現在あるアマモ場を維持できるような対策技術を開発・確立していくことが重要である。

2.4 海草類の分布とアマモの季節変化

香川県内のアマモの季節変化については、瀬戸内海東部、播磨灘に面するさぬき市津田町平畑地先の天然アマモ群落と津田地先にある消波離岸堤背後域の造成アマモ群落について長期間モニタリングが実施された報告^{16,17)}があるが、アマモ現存量の季節変化に関する報告はまだない。

本章4項以降では、香川県小豆島沿岸域において、海草類の分布状況と小豆島南岸の土庄町弁天島西岸(以下、「土庄町地先」と記す)での天然アマモ群落の季節変化と生態的特性の把握から、アマモ場回復技術の高度化に資することを目的に試験研究を行なった。

海草類の分布調査は2004年6月から2007年4月に実施した。小豆島の海岸線(図2.3)に沿って、香川県庵治漁業協同組合所属の「一義丸」(6.2トン)を航行させ、過去に記録のあるアマモ場¹⁸⁾とアマモが分布している可能性がある水深帯の湾・地先についてアマモ群落の有無の確認を行った。海草(アマモ、コアマモ、ウミヒルモ)の有無は、調査船で可能な限り浅所まで近寄り、干潮時には船上目視で、満潮時にはスキューバ潜水により確認した。海草の生育が確認された場合には、株密度を測定した後、分布範囲を調べるため、調査船に設置してある魚群探知機によりアマモ群落を確認しながら群落上を蛇行し、海図と照合しながらGPSにより群落の沖出し方向の広がり(上限・下限間の距離)と水平的な広がり(幅)を確認し、面積を算出した。

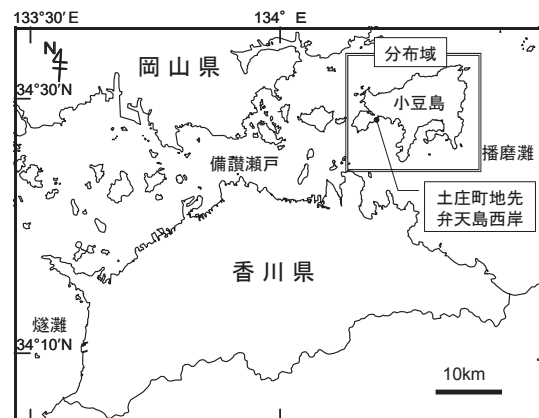


図2.3 調査位置図

また、アマモ群落の季節変化を解明する目的で、土庄地先の天然アマモ群落において2006年4月から2007年12月まで月1回の頻度（計21回）で、スキューバ潜水による観察を行った。群落は水深 C.D.L.（基本水準面 chart datum level からの水深）±0.0m～-2.0m 程度に分布し、ほぼ1.6 ha（2005年10月時点）であった。観察は、アマモ群落内の C.D.L. -1.0m 付近に1×1m の定置枠を2枠設置し、枠内のアマモの株数を計数し平均値を求めた。

観察期間中の2006年4月から2007年4月まで月1回の頻度（計13回）で、アマモ群落内の密度が高い場所を目視で選定し、50×50cm の方形枠を設置して、枠内の地上部にあるアマモ草体と地下部にある根茎部を全て丁寧に刈り取りし、アマモ試料のサンプリングを行った。得られた試料を研究室に持ち帰り、付着した汚れや泥をきれいに洗い流した後、最も新しい根を発出している節を第1節として、ここを境に地上部と地下部に切り分けた。地上部については、栄養株、実生株（種子から発芽した痕跡が残っている株）、花枝にわけ、それぞれ株数と草体長を測定した後、基部から20cm ほどの長さに切り分けて現存量を求めた。地下部は、地下茎と根をあわせてものを根茎部とし、一括して現存量を求めた。現存量は、地上部と地下部の部位をあらかじめ十分風乾した後、送風乾燥機により80℃で24時間乾燥させて乾燥重量として求めた¹⁹⁾。

2.5 調査結果および考察

(1) 分布域

小豆島沿岸で確認された海草は、アマモ、コアマモ、ウミヒルモであった。確認されたアマモ群落（アマモを優占種とする海草群落を指す）のほとんどは、海底面の傾斜の影響で沖だし方向の広がりがほとんどみられず、海岸線に沿って細長く帯状に分布していた。小豆島沿岸の主要なアマモ群落について表2.2、図2.4と図2.5に示した。

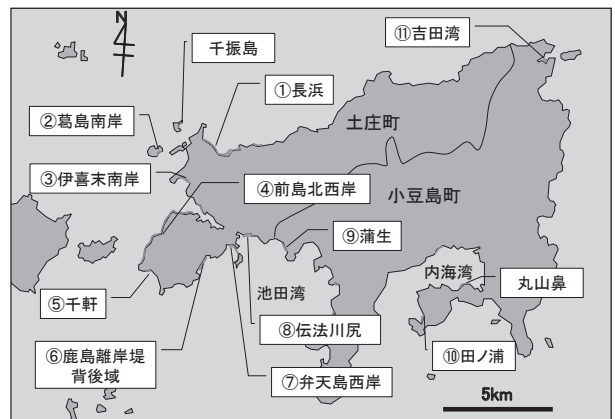


図 2.4 小豆島沿岸における主要なアマモ群落の分布状況

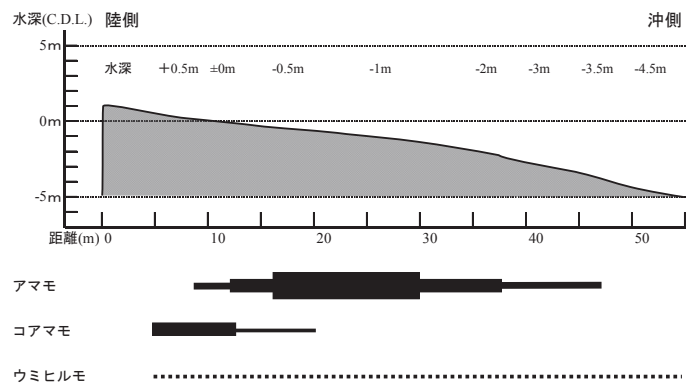


図 2.5 小豆島沿岸における主要な海草類の垂直分布状況（実線の太さは密度の濃淡，点線は点在を示す）

確認したアマモ群落の中では、土庄町長浜のアマモ群落が最大で6.5 ha 程度であった。コアマモは土庄町長浜、前島北西岸、小豆島町田ノ浦、吉田湾奥で確認されたが、アマモ群落よりも浅い場所で繁茂している場合が多かった。ウミヒルモは土庄町千振島南東岸、小豆島町内海湾丸山鼻で、アマモがごく点生している付近にわずかに分布していた。

表 2.2 小豆島沿岸における主要なアマモ群落一覧（2004～2007）

| NO. | 町名 | 地先名 | 確認種 | 推定面積 (ha) | 調査年月日 | 測定地点 | | 備考 |
|-----|------|----------|----------|--------------|-------------|-------------------|----------------------------|------|
| | | | | | | 水深(C.D.L.) (m) | 株密度 (株/m ²) | |
| 1 | 土庄町 | 長浜 | アマモ・コアマモ | 6.5 | 2006年10月18日 | -0.2 | 100 | |
| 2 | 土庄町 | 葛島南岸 | アマモ | 1.5 | 2006年10月18日 | -2.3 | 100 | |
| 3 | 土庄町 | 伊喜末南岸 | アマモ | 0.6 | 2006年10月18日 | -1.4 | 50 | |
| 4 | 土庄町 | 前島北西岸 | アマモ・コアマモ | 1.5 | 2006年10月18日 | — | — | |
| 5 | 土庄町 | 千軒 | アマモ | 1.0 | 2006年10月18日 | -2.2 | 75 | |
| 6 | 土庄町 | 鹿島離岸堤背後域 | アマモ | 1.5 | 2005年10月8日 | -2.4 | 72 | |
| 7 | 土庄町 | 弁天島西岸 | アマモ | 1.6 | 2005年10月8日 | -2.1 | 48 | 土庄地先 |
| 8 | 土庄町 | 伝法川尻 | アマモ | 4.8 | 2005年10月8日 | -2.0 | 68 | |
| 9 | 小豆島町 | 蒲生 | アマモ | 0.3 | 2006年10月18日 | — | — | |
| 10 | 小豆島町 | 田ノ浦 | アマモ・コアマモ | 0.6 | 2004年6月4日 | — | — | |
| 11 | 小豆島町 | 吉田湾奥 | アマモ・コアマモ | 2.0 | 2007年4月5日 | -1.0 | 100 | |

また、確認されたアマモ群落の垂直分布については、水深 (C.D.L) ±0.0〜-4.0m の範囲で生育を確認し、水深-0.5〜-1.5m 前後が最も株密度が高かった。アマモが生育する底質の粒度組成を測定した結果では、粒径 63〜249 μm (細砂, 小砂) が 80% を占めていた。

(2) 土庄町地先での群落の季節変化

1) 株密度

定置枠内のアマモ株密度の季節変化を図 2.6 に示した。最大株数は、2006 年では 6 月に 97 株/m²、2007 年では 4 月に 123 株/m²であった。最小株数は、2006 年では 10 月に 38 株/m²、2007 年では 11 月に 17 株/m²であった。株密度は 1 月〜6 月頃にかけて増加し、両年とも 8 月〜10 月頃にかけて減少した。その後 10 月〜12 月頃まで低い水準で推移した。花枝は、1 月頃から徐々に栄養株から変化して、3 月頃にははっきりとした花枝の形態となり、7、8 月頃には枯死流出して確認されなくなった。

刈り取りしたアマモの株数の季節変化を図 2.7 に示した。こちらも定置枠とはほぼ同様の季節変化を示した。最大株数は、2006 年では 6 月に 220 株/m²、2007 年では 3 月に 184 株/m²であった。最小株数は、2006 年では 9 月に 36 株/m²であった。実生株は 2007 年 1 月〜4 月に加入が確認され、確認された月の全株数に対する割合は 3.3〜8.1%であった。花枝は 3 月〜7 月に確認され、確認された月の全株数に対する割合は 2006 年 4 月〜7 月で 12.7〜16.3%、2007 年 3 月〜5 月で 5.4〜8.7%であった。

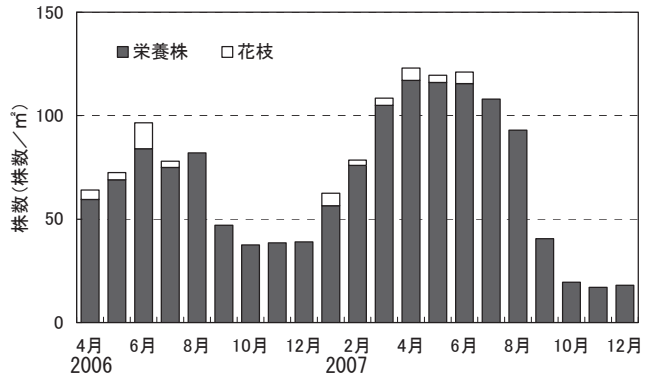


図 2.6 定置枠内 (1×1m) のアマモ株密度の季節変化 (小豆島土庄地先, 2006.4~2007.12)

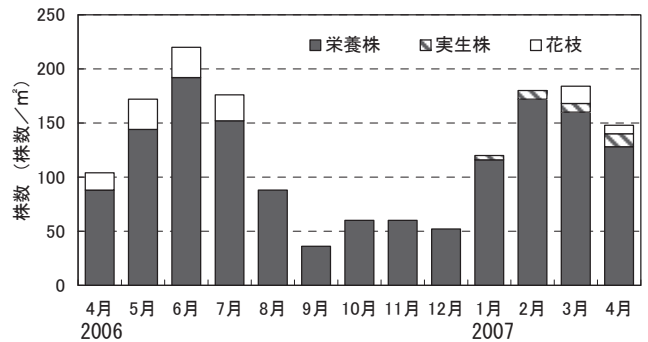


図 2.7 刈り取りしたアマモ株数の季節変化 (小豆島土庄地先, 2006.4~2007.4)

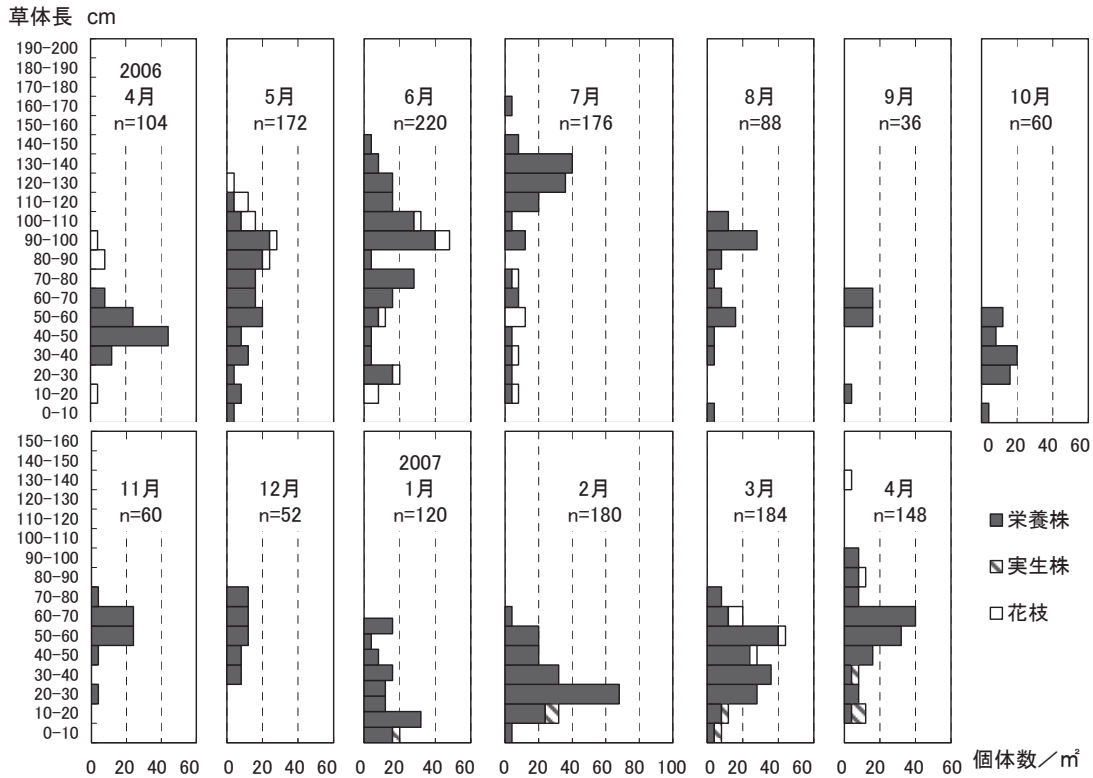


図 2.8 刈り取りしたアマモ草体長組成の季節変化 (小豆島土庄地先, 2006.4~2007.4)

2) 草体長組成

刈り取りしたアマモの草体長組成の季節変化を図 2.8 に示した。栄養株は、調査を開始した 2006 年 4 月では最大 67cm であったものが、7 月には最大 166cm となり大きく伸長した。8 月から葉体の枯死がはじまり草体は徐々に短くなり 10 月には最大でも 57cm となった。その後 2 月まで最大で 70cm 前後で推移し、3 月頃から再び伸長しはじめた。実生株は 1 月～4 月の間で観察され、1 月頃から群落に出現してきた分枝した栄養株とともに徐々に伸長し、4 月には 30～40cm 程度に生長した。花枝は 4、5 月には栄養株よりも長かったが、6 月には草体上部の花穂部分から枯死脱落して茎のみが残った株が観察されるようになった。7 月にはその傾向がより顕著になり、8 月には消失した。

3) 現存量

刈り取りしたアマモの現存量の季節変化と土庄地先水温について図 2.9、表 2.3 に示した。地上部の現存量は、6 月～7 月頃に高い値を示し、2006 年 6 月が最大で 355.2gD.W./m² となった。その後、7 月頃には花枝の流出が起こり、8 月頃から栄養株の衰退に伴う現存量の減少が顕著であった。現存量は、2006 年 9 月～2007 年 1 月頃まで低い値を示し、2006 年 10 月が最小で 26.0gD.W./m² であった。1 月～6 月にかけて、実生株の発生や盛んに分枝して増加した株数と共に 5 月～6 月の草体の生長に伴う大型化により、現存量は急激に増大していった。特に 5 月は花枝の割合が大きくなり、地上部現存量の約 35% を占めた。地下部の現存量は、地上部ほど変動幅は大きくなく、地上部の現存量とほぼ同調した季節変化を示した。2006 年 6 月が最大で 173.6gD.W./m² となり、9 月が最小で 36.4gD.W./m² となった。

水温との対比では、水温上昇期に現存量は急激に増加するが、28℃前後の高水温になる時期には現存量は減少をしていた。水温下降期では現存量は低い水準で推移し、水温の上昇とともに再び現存量は増加をはじめた。

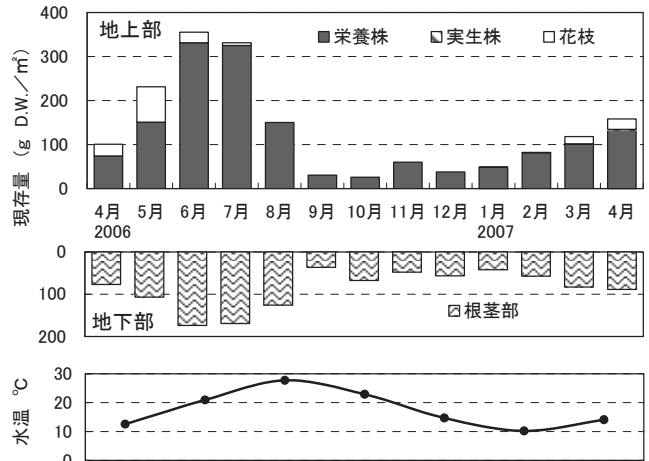


図 2.9 アマモ現存量の季節変化と土庄地先水温 (小豆島土庄地先, 2006.4～2007.4)

層別現存量の季節変化を図 2.10 に示した。層別現存量は、5、6 月を除いて上部が少なく下部につれて多くなるイネ科型を示した。栄養株の現存量は、2006 年 4 月～6 月にかけて株数の増加と草体長の大型化に伴い各層で増加し、7、8 月頃から群落の下部から減少に転じた。その後、2006 年 9 月～2007 年 1 月までは、ほぼ同様の構造で推移したが、2007 年 2 月になると群落の下部から徐々に増大していった。実生株の加入割合は、確認された月の全株数の 3.3～8.1% であったが、現存量としては小さく、確認された月の地上部現存量に対する割合はすべて 1% 程度であった。花枝の現存量は、栄養株からはっきりと変化する 3、4 月には各層にほぼ均一にみられたが、伸長しながら花穂が発達する 5 月では 40cm 以上の上部で占める割合が大きくなった。6 月に入ると枯死が始まり草体上部の花穂の脱落等により上部の現存量が急激に減少し、7 月には茎が残る程度で現存量は小さくなった。

本調査により、香川県小豆島沿岸の海草類のおおまかな分布域と小豆島南岸の土庄地先におけるアマモ群落の現存量の季節変化が明らかになった。

表 2.3 現存量と株数の推移 (土庄地区 2006.4～2007.4)

| 項目 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 合計 |
|------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| 栄養株 | g乾重/m ² | 74.0 | 150.8 | 331.2 | 324.8 | 150.4 | 30.4 | 26.0 | 59.9 | 37.6 | 48.4 | 81.6 | 100.8 | 1549.2 |
| | 株数 | 88 | 144 | 192 | 152 | 88 | 36 | 60 | 60 | 52 | 120 | 180 | 168 | 140 |
| 花枝 | g乾重/m ² | 26.8 | 80.4 | 24.0 | 6.4 | — | — | — | — | — | — | — | 16.8 | 23.6 |
| | 株数 | 16 | 28 | 28 | 24 | — | — | — | — | — | — | — | 16 | 8 |
| 葉条部計 | g乾重/m ² | 100.8 | 231.2 | 355.2 | 331.2 | 150.4 | 30.4 | 26.0 | 59.9 | 37.6 | 48.4 | 81.6 | 117.6 | 156.8 |
| 根茎部 | g乾重/m ² | 76.8 | 106.8 | 173.6 | 169.2 | 126.0 | 36.4 | 67.6 | 47.6 | 56.1 | 42.0 | 56.6 | 82.6 | 1129.8 |

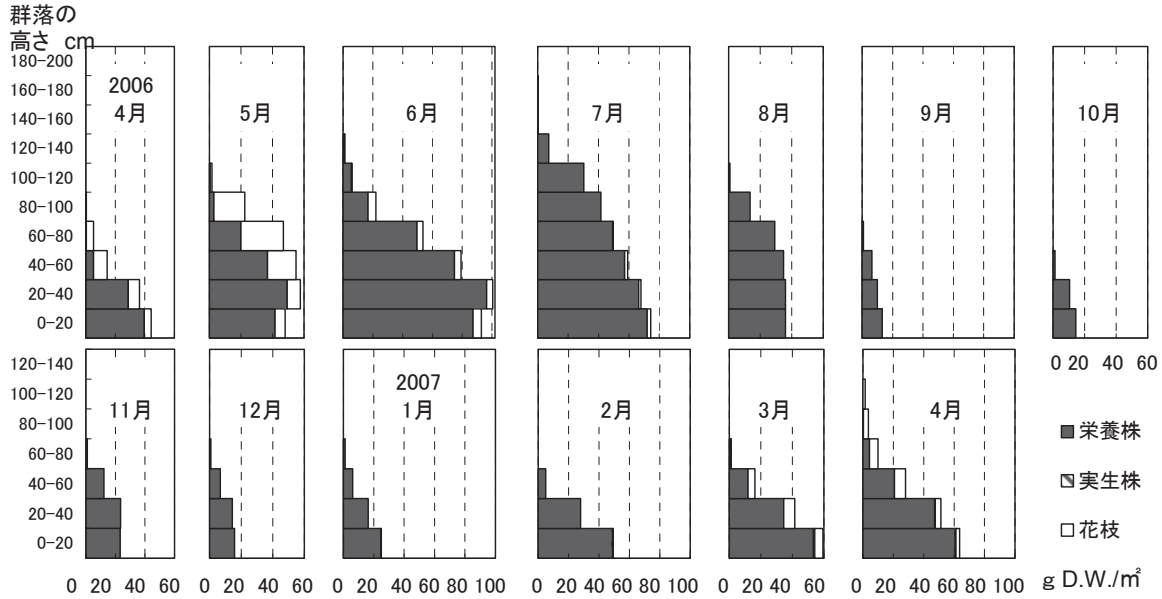


図 2.10 アマモ層別現存量の季節変化 (小豆島土庄地先, 2006.4~2007.4)

過去に小豆島沿岸のアマモ群落の分布状況を調べたものでは、1989年と1996年に行われた自然環境保全基礎調査に関係するもの^{18,20)}がある。今回確認したアマモ群落の中で、過去に消滅した記録があるアマモ場は、1989年の土庄町長浜、1996年の伝法川尻と弁天島西岸であったが、これらはすべて再生していた。小豆島沿岸のアマモ場総面積の推移をみると、1989年では19.8 ha、1996年では31.0 haと増加していたが、本調査では21.9 haと1996年より減少していた。特に土庄町長浜のアマモ群落は、1989年では消滅、1996年では15.0 ha、本研究では6.5 haと変動が大きく、アマモ群落は場所によって10年程度の期間でも、その面積が大きく増減することがあると考えられた。アマモの生育水深帯については、透明度の状況により左右され、近年では透明度が改善されたことにより、より深い場所へとアマモの分布域がひろがりつつある。

株密度について国内の多年生アマモ群落の季節変化をみると、三重県松名瀬地先では164~972株/m²²¹⁾、京都府舞鶴湾では140~420株/m²²²⁾、静岡県岩地湾では40~252株/m²²³⁾、北海道野付湾では約180~300株以上/m²²⁴⁾であった。土庄地先の株密度は、株数の多い地点を選んで採取したにもかかわらず、36~220株/m²と上記の既往調査結果と比較して、やや少ない値であった。これらの値は50×50cm程度の方形枠内のアマモを刈り取って測定したものであるが、今回、刈り取りを行った付近の海底面に設置した1×1mの定置枠内のアマモ株密度は、17~123株/m²であり、香川県さぬき市平畑地先の12~109株/m²¹⁶⁾とはほぼ同程度であった。このようにアマモ株密度の調査結果については、用いた方形枠の大きさによっても差が生じること、同一アマモ群落内の

同一水深帯でも株密度に大きなばらつきがあることを考慮にいれる必要がある。

花枝の出現率について国内の多年生アマモ群落での事例をみると、三重県松名瀬地先では16~34%で、5月が最高で34%²¹⁾、京都府舞鶴湾では、花枝は2月~6月に出現し、形成率は2~31%で特に5,6月で30%以上²²⁾、静岡県岩地湾では6,7月に割合が高く6月で36%²³⁾、北海道野付湾では4月に約10%で、5月に最大で28%²⁴⁾、静岡県浜名湖では4月に約20%²⁵⁾、香川県さぬき市津田地先では、花枝は3月~6月に出現し、形成率は2~21%で特に4,5月が高いが年変動がみられた¹⁶⁾。土庄地先では、2006年4月~7月で13~16%、2007年3月~5月で5~9%であり、年変動はあるが上記の既往調査結果と比較して、やや少ない値であった。

アマモ群落の地上部の現存量について国内の多年生アマモ群落の季節変化をみると、三重県松名瀬地先では26.9~345.7gD.W./m²²¹⁾、京都府舞鶴湾では70.0~678.0gD.W./m²²²⁾、北海道野付湾では約190~370gD.W./m²²⁴⁾、静岡県浜名湖では8.0~270.4gD.W./m²²⁵⁾であった。北半球におけるアマモ群落の平均的な現存量は、100~500gD.W./m²²⁶⁾とされており、土庄地先の現存量は、26.0~355.2gD.W./m²であったので、ほぼその範囲内であった。地下部の現存量については周年調査した事例が少なく、三重県松名瀬地先では22.6~92.7gD.W./m²であり、地上部と地下部の現存量の変化に3~4ヶ月のずれが生じていた²¹⁾が、土庄地先では36.4~173.6gD.W./m²であり、地上部と地下部はほぼ同調したパターンで変化していた(図2.9)。土庄地先ではアマモ1株の草丈が大きいために根茎部も同時期にそれに見合った発達をするもの

表 2.4 アマモ現存量等の調査事例

| 研究場所 | 株数 (刈取) /m ² | 花枝出現率 | 地上部現存量 gD.W./m ² | 地下部現存量 gD.W./m ² | 備 考 |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| 香川県 小豆島土庄地先 | 36 ~ 220株 | 3月~7月、5~16% 5月に最大で16% | 26.0 ~ 355.2 | 36.4 ~ 173.6 地上部と同調 | 2006~2007 データ 本研究第2章 |
| 三重県 松名瀬地先 | 164 ~ 972株 | 16~34% 5月に最大で34% | 26.9 ~ 345.7 | 22.6 ~ 92.7 地上部と3,4ヶ月ズレ | 2000~2002 データ 阿部他 ²¹⁾ , 2004 |
| 京都府 舞鶴湾 | 140 ~ 420株 | 2月~6月、2~31% 5,6月で30%以上 | 70.0 ~ 678.0 | | 道家他 ²²⁾ , 2000 |
| 静岡県 岩地湾 | 40 ~ 252株 | 6,7月で割合高い 6月に最大で36% | | | 1977 データ 林田 ²³⁾ , 1999 |
| 北海道 野付湾 | 約180 ~ 300株以上 | 4月に約10% 5月に最大で28% | 約190 ~ 370 | | 1980 データ 水島 ²⁴⁾ , 1985 |
| 静岡県 浜名湖 | | 4月に約20% | 8.0 ~ 270.4 | | 1979~1980 データ 今尾他 ²⁵⁾ , 1985 |
| 香川県さぬき市 津田離岸堤背後域 | | 3月~6月、2~21% 4,5月で20%以上 | | | 1998~2005 ¹⁶⁾ データ 藤原他, 2006 |
| 北半球 | | | 100 ~ 500 | | 向井 ²⁶⁾ , 1982 |

と推測された。これらの調査事例について表 2.4 に整理した。

土庄地先のアマモ群落では、水温上昇期に株数、現存量が増加し、高水温期頃には株数、現存量が減少するというパターンであった。特に水温上昇期が群落を維持する上で重要な時期であると考えられた。土庄地先での実生株の加入は、3~8%と少なく、減耗が大きいことが考えられ、土庄地先のアマモ群落は通常の多年生アマモ群落と同様に、栄養株が分枝・生長することで維持されているものと推察された。

以上のことから、さまざまなアマモ群落の特徴を把握することは、環境の異なるそれぞれの地先にあったアマモ場造成技術を考案するための有用な基礎的資料となり、効果的なアマモ場造成事業を行う一助となる。

ただし、分布域については、比較的短期間で変動していることが考えられ、調査する季節によってもアマモ群落の規模や株密度は異なるので、アマモ群落の状況を把握する上で重要な情報となる面積の調査は、同一時期、同一手法で定期的実施する体制を整備する必要がある。また、分布するアマモ草体についても、灘部で細く、瀬戸部で太い傾向（未発表）が確認されており、様々な方向に向いた湾や島影の浅海域で繁茂している同一のアマモ群落内でも浅所と深所で草体長に差があったり、株密度、実生株の加入状況、花枝の出現率に差があったりしている。今後はこれらのことを念頭において、様々な特徴をもつアマモ群落をより正確に把握・評価するために、海域・群落ごとに詳細な調査を行っていく必要がある。アマモ場を造成するにあたり、造成場所付近の天然アマモの状況を知ることは重要なことである。

最後に、このようなアマモ類を含めた海藻類の分布調

査は、環境省が行っている「自然環境保全基礎調査」があるが、近年は全国全ての藻場を対象にはしておらず、重要な藻場を選出する形でしか実施されていない。沿岸環境の変化を把握するためには、アマモだけではなく海藻類全般の分布状況を細かく把握することが必要である。せめて10年単位程度の間隔で、全国規模の同一手法による、全国一斉の藻場分布調査を早急に行う必要がある。

参考文献 <第2章>

- 1) 小河久朗：1988, 藻場, 栗原康編著, 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー. 東海大学出版会, 335pp.
- 2) Larkum, A.W.D., R.J. Orth and C.M. Duarte:2006, Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. Netherlands, Springer.
- 3) 大野正夫・小河久朗：1987, 海藻資源養殖学 (徳田廣大野正夫 小河久朗編). 緑書房, 東京都, 201-246.
- 4) 水産庁・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.
- 5) 菊池泰二:1973, 藻場生態系, 山本護太郎編:海洋生態学. 東大出版会, 東京, 23-37.
- 6) 大場達之・宮田雅彦:2007, 日本海草図譜. 北海道大学出版会, 北海道, 114pp.
- 7) 藤原宗弘:2007, 生物多様性に配慮したアマモ場造成技術開発調査事業 アマモ類の遺伝的多様性の解析調査平成18年度報告書 (最終報告書). 独立行政法人水産総合研究センター東北海区水産研究所, 115-119.
- 8) 環境省:2004, 藻場の復元に関する配慮事項.
- 9) 島谷学・中瀬浩太・岩本裕之・中山哲巖・月舘真理雄・

- 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，49，1161-1165.
- 10) 福田富男・安家重材：1980，天然モ場におけるアマモの分布と消長．昭和54年度岡水試事報，147-152.
- 11) 今尾和正・伏見 浩：1985，浜名湖におけるアマモ (*Zostera marina L.*)の生態，特に一年生アマモの成立要因．藻類，33，320-327.
- 12) 玉置仁・田中敏博・荒武久道・渡辺雅子・松本里子・山本智子・相生啓子・新井章吾：2007，藻類，55，1-6.
- 13) C.J.Keddy, D.G.Patriquin:1978, An annual form of eelgrass in Nova Scotia. Aquatic Botany, 5,163-170.
- 14) Frances van Lent, Jacobus M.Verschuure:1994, Intraspecific variability of *Zostera marina L.* (eelgrass) in the estuaries and lagoons of the southwestern Netherlands. I. Population dynamics. Aquatic Botany, 48, 31-58.
- 15) 藤原宗弘：2006，備讃瀬戸南部海域で観察された1年生アマモとその群落の特長．平成17年度瀬戸内海ブロック水産業関係試験研究推進会議 生産環境・漁業生産合同部会 議事要録，101-105.
- 16) 藤原宗弘・山賀賢一・吉田吾郎・寺脇利信：2006，離岸堤背後域での播種アマモの長期変動．水産工学，43(2)，173-177.
- 17) Fujiwara M, Yamaga K, Yoshimatsu S, Miyagawa M, Suenaga Y: 2011, Resaech on the appropriate condition for *Zostera* bed in the coastal area. Recent Advances in Marine Science and Technology 2010 PACON International, 12-21.
- 18) 山賀賢一・藤原宗弘：1998，藻場分布及び消滅状況調査．平成8年度香水試事報，108-114.
- 19) 有賀祐勝・井上勲・田中次郎・横浜康繼・吉田忠生：2000，藻類学 実験・実習，講談社，東京，128-129.
- 20) 香川県：1989，第4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，香川，1-21.
- 21) 阿部真比古・橋本奈央子・倉島彰・前川行幸：2004，三重県松名瀬沿岸におけるアマモ群落の構造と季節変化．日水誌，70(4)，523-529.
- 22) 道家章生・井谷匡志・葭矢護：2000，舞鶴湾におけるアマモ群落の特徴－I－密度，現存量，草丈組成の季節変化－．京都海洋セ研報，22，22-28.
- 23) 林田文郎：2000，伊豆半島・岩地湾におけるアマモ群落の垂直分布と季節変動．日水誌，66，212-220.
- 24) 水島敏博：1985，野付湾のアマモ現存量と生産量の季節変化．北水試報，27，111-118.
- 25) 今尾和正・伏見浩：1985，浜名湖におけるアマモ (*Zostera marina L.*)の生態，特に一年生アマモの成立要因．藻類，33，320-327.
- 26) 向井宏：1982，アマモ (*Zostera marina L.*)の生態と生理「海草藻場（特にアマモ場）と水産生物について」．日本水産資源保護協会，東京，1-48.

第3章 半閉鎖性海域におけるアマモ生育環境の評価

3.1 アマモ生育環境要因の評価の位置付けとアマモ場造成計画策定の手順

アマモの生育環境要因については、今まで様々な調査・研究が進められており、個々の制限要因の限界値が推定されている¹⁻⁶⁾。現在のアマモ場造成手法は、それらの制限要因条件を緩和・改善する技術として開発が進められている。しかし、アマモ場造成により安定したアマモ場が維持されている事例はそれほど多くはない。これはアマモの生育環境要因が複雑かつ複合的に作用していることが原因と考えられ、現在のアマモ造成手法がその造成場所での対策（海底面の嵩上げや底質改良等）として最適であるかどうか検討を行う必要があることを示唆している⁷⁾。例えばアマモ場の水理環境の指標であるシールス数（底質の移動状態を表すパラメータ）については、生育環境限界値として森口ら⁸⁾は0.27以下、川崎ら⁹⁾は0.08以下を示しているが生育場所により幅がある。また現存のアマモ場において、生育環境条件をほぼ満たしている隣接した海域でもアマモが生息していないこともあり、これらは海域特性・地域特性によるものか、もしくは他の環境条件との複雑な関わりにより生じるものか解明されていない。

そこで本章では、香川県における代表的な半閉鎖性内湾である屋島湾を対象海域として選定し、海域内のアマモ生息場の海域環境とその周辺のアマモが生息していない場の海域環境について現地調査を行い、アマモ生育環境要因を個々の取り扱いから、複雑な環境条件の相互関連性について、SOM（自己組織化マップ）により評価・検討¹⁰⁾することとした。SOMは、一般のニューラルネットワーク技術で必要とされる「教師値」を設定することなく、複雑な相互関連性を組織化することが可能なため、本章で目的としているアマモの生息環境要因を解明する上で有効な手法だと考えられた。

アマモ生育環境データの収集から、その生育環境要因の評価・分析、アマモ場造成計画策定に至る計画までのアプローチを図3.1に示した。

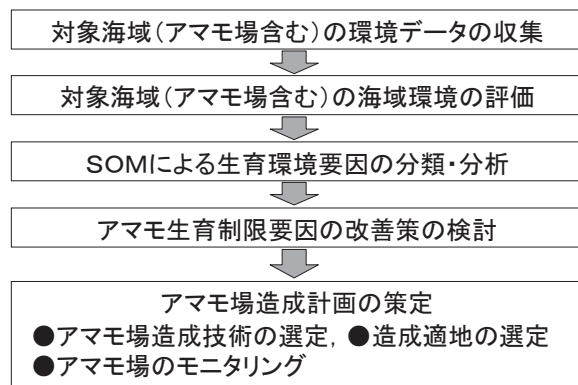


図3.1 データ収集から計画策定までのフロー

3.2 アマモ生育環境要因と造成技術の現状

アマモ生育環境要因の項目および生育限界値は既存資料¹⁻³⁾を参考とした。また、個々の生育環境要因に対して改良・改善することを目的に提案された代表的なアマモ場造成技術について整理を行った（表3.1、表3.2）。

表3.1 アマモ生育環境要因の項目および生育限界値

| 項 目 | 生 育 限 界 値 |
|-----------|----------------------------|
| 水深 | ±0～－8m (C.D.L.) |
| 水中光量 | 年平均 3E/m ² ・日以上 |
| 水温 | 8月平均水温28℃以下 |
| 塩分 | 17～34 |
| 底面流速 | 0.6m/sec 以下 |
| シールス数 | 0.2以下 |
| 海底勾配 | 1/50以下 |
| 底質粒径 | 0.14～0.39mm |
| シルト | 底質成分の30%以下 |
| 砂分 | 底質成分の80～100% |
| 底質 (COD) | 10mg/g以下 |
| 底質 (全硫化物) | 1mg/g以下 |

表3.2 アマモ場造成技術の現状

| 制 限 要 因 | 対 応 した 造 成 技 術 |
|---------|------------------|
| 光量不足 | 海底面の嵩上げ、浮き藻場システム |
| 砂泥の安定性 | 波浪制御（波浪対策） |
| 底質改善 | 底質置換・改善、覆砂 |
| 種子不足 | 栄養株移植、播種 |

3.3 現地概要と現地調査内容

(1) 現地概要

本章の調査対象海域である高松市屋島湾（図3.2）は、香川県の代表的な半閉鎖性内湾であり、年間を通じて波浪の影響は少ない。波高1.0m以上の出現率はほとんどなく、アマモに与える物理環境としての外力は潮汐変動が主と推察される。アマモは屋島湾沿岸の浅海部に点在する状況であり、アマモ繁茂範囲は経年的に減少傾向にあった。

(2) 現地調査内容

海域内のアマモ生息場の海域環境とその周辺のアマモが生息していない場所の海域環境について2004年～2006年にかけて現地調査を行った。観測地点は、図3.2に示すように屋島湾の湾口部から湾奥部にかけての17地点とし、屋島湾における海域環境の平面分布を把握し、各々の海域環境データの比較・検討を行った。その後、2010年には、航空機撮影によってアマモを含む海藻類の分布状況を確認した。

3.4 アマモ生育環境要因の整理

生育環境のデータについては、現地調査結果に加えて、水質観測データ（香川県水産試験場）、全天日射量および

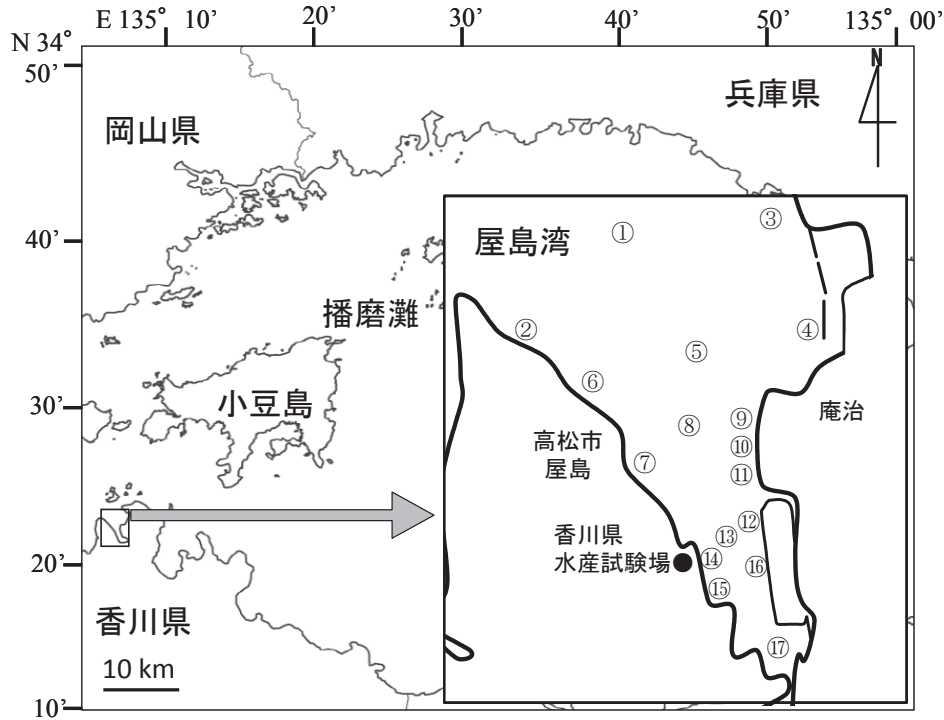


図 3.2 調査対象海域(瀬戸内海東部, 香川県高松市)

表 3.3 現地調査結果

| 観測地点 | アマモの有無 | 水深 (C.D.L.) (m) | 水中光量 (底層) E/m ² 日 | 底質 (中央粒径) (mm) | 底質(シルト含有率) % | 底質(シルト+細砂含有率) % | 底質 (COD) mg/g | 底層流速 m/sec | シルト ² 数 |
|------|--------|-----------------|------------------------------|----------------|--------------|-----------------|---------------|------------|--------------------|
| ① | × | -12.5 | 0.06 | 1.970 | 0.8 | 51.3 | 9.4 | 0.280 | 0.0218 |
| ② | ○ | -3.0 | 1.56 | 0.470 | 2.6 | 85.0 | 2.0 | 0.103 | 0.0124 |
| ③ | × | -5.0 | 0.49 | 0.654 | 2.1 | 76.5 | 3.6 | 0.056 | 0.0024 |
| ④ | × | -5.0 | 0.49 | 0.119 | 27.8 | 99.9 | 20.5 | 0.032 | 0.0023 |
| ⑤ | × | -4.7 | 0.75 | <0.075 | 90.5 | 99.9 | — | 0.094 | 0.0273 |
| ⑥ | × | -4.5 | 0.68 | <0.075 | 56.7 | 99.9 | — | 0.041 | 0.0012 |
| ⑦ | ○ | -3.6 | 0.41 | 0.123 | 31.3 | 100.0 | 23.3 | 0.023 | 0.0013 |
| ⑧ | × | -3.6 | 0.41 | <0.075 | 91.6 | 99.8 | — | 0.072 | 0.0174 |
| ⑨ | × | -3.8 | 0.45 | <0.075 | 90.1 | 99.9 | 21.4 | 0.042 | 0.0058 |
| ⑩ | × | -3.7 | 0.43 | <0.075 | 92.0 | 99.7 | — | 0.040 | 0.0053 |
| ⑪ | ○ | -2.0 | 3.87 | 0.152 | 32.0 | 99.7 | 19.7 | 0.023 | 0.0022 |
| ⑫ | × | -3.9 | 0.47 | <0.075 | 98.0 | 100.0 | — | 0.019 | 0.0012 |
| ⑬ | × | -3.5 | 0.39 | <0.075 | 79.6 | 99.1 | — | 0.046 | 0.0072 |
| ⑭ | × | -3.2 | 0.33 | <0.075 | 78.2 | 99.5 | — | 0.031 | 0.0034 |
| ⑮ | ○ | -1.7 | 7.03 | 0.178 | 87.0 | 98.6 | 21.2 | 0.022 | 0.0012 |
| ⑯ | × | -4.3 | 0.60 | <0.075 | 87.1 | 99.2 | — | 0.025 | 0.0020 |
| ⑰ | × | -1.4 | 5.68 | <0.075 | 80.9 | 98.6 | — | 0.012 | 0.0001 |

・アマモの有無については2004~2010年データ, 分析項目については2006年7月データ.

・底層流速は, 流況シミュレーションにより算出.

・海底勾配は全観測地点で1/50以下であった.

・シルトは0.106mm以下、細砂は0.250mm以下.

日照時間(香川県高松地方気象台観測データ)を整理し, 流況については屋島湾の潮位観測データを用いて流況シミュレーションを行った.

(1) 現地調査結果

結果を表 3.3 に示す. 調査対象海域内の 17 地点で現地

観測を行った結果, 湾内の 4 地点 (②⑦⑪⑮) でアマモの分布を確認した. アマモの生育水深帯は-3.8m~0.3m (C.D.L.) であった. 底質は, 湾口部の 1 地点①を除き, 粒径 0.7mm 以下であり, 細砂もしくはシルトが主体のものであった. 底質の硫化物は全ての観測地点で 1.0mg/g

以下であった。

(2) 流況シミュレーション

屋島湾の潮汐データを基に流況シミュレーション¹⁴⁾を行ない、湾内における流況分布の検討を行った。生息環境要因である流速について検討を行うにあたり、計算条件として潮汐の最強時の値（当該海域においては下げ潮時）を採用した。潮流の計算には、3次元マルチレベルモデルを用いた。マルチレベルモデルの基礎式は、(1)~(6)式に示した運動量、質量、熱量、塩素量の保存式と状態方程式を鉛直方向に積分する事により導かれる。数値計算では、これらの基礎式を差分法により離散化した。離散化方法については、時間差分についてはLeap Frog法、空間差分については2次精度中心差分とした。水平格子間隔は50mで、水平方向には52×88メッシュ、鉛直方向には2層（上層0~5m, 下層5m~海底）とした。境界条件としては、屋島湾湾口部の東西に2つの開境界を設け、M2分潮の潮汐を与えて湾内の流速を計算した。計算の詳しい記述は、第5章に示すこととし、計算結果を図3.3に示した。

a) x方向の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_0 v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} + N_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + N_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots(1)$$

b) y方向の運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f_0 u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial y} + N_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + N_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \dots(2)$$

c) z方向の運動方程式

$$-g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(3)$$

d) 連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

e) 自由表面の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\zeta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\zeta} v dz \right) \dots\dots(5)$$

f) 熱収支・塩素量収支の式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (u \cdot T) - \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot T) - \frac{\partial}{\partial z} (w \cdot T) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots(6)$$

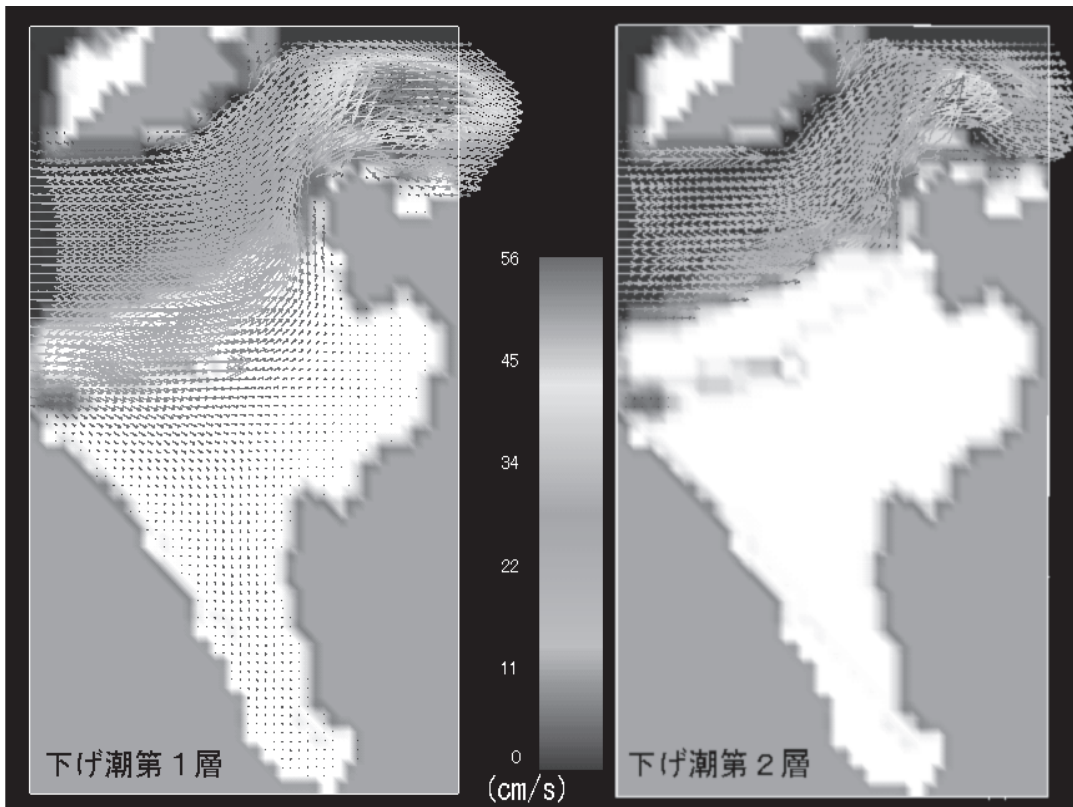


図 3.3 屋島湾における流況分布計算結果

ここで、 x, y, z は平均海面上の一点を原点とする直交座標系の座標、 t は時間、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、 f_0 はコリオリパラメータ、 g は重力加速度、 P_0 は大気圧、 ρ は海水の密度、 N_x, N_y, N_z は x, y, z 方向の渦動粘性係数、 ζ は平均水面から自由表面までの高さ、 T は流体の質量温度（塩素量収支の場合は S ）、 k_x, k_y, k_z は x, y, z 方向の熱拡散係数（塩素量の場合は塩素量拡散係数）を表す。

(3) シールズ数の算出

現地調査結果との比較による計算精度の検証後、観測点に対応する地点の底質分析データと流況シミュレーション結果から得られた流速データを用いて、シールズ数を算出した。その値は0.001~0.027であり、調査海域は静穏域で、アマモの生育制限要因として直接的な影響（流れによる草体の流出など）は少ないものと考えられた（表3.3）。なお、対象海域は半閉鎖性内湾であり、波高の影響は少ないと考えられたことから、潮汐流（最強時）を用いて算出するものとした。なお、シールズ数(Ψ)は流速(U)のみが作用する場合として、以下の式により求めた⁹⁾。

$$\Psi = u^* / (S1) \cdot g \cdot D$$

$$u^* = U / (5.75 \cdot \log_{10}(h/D) + 6) \dots\dots(7)$$

u^* : 摩擦速度
 S : 底質の比重
 g : 重力加速度
 h : 水深
 D : 中央粒径

3.5 SOM(自己組織化マップ)による評価・分析

(1) SOM とは

SOM (Self-Organizing feature Map) はニューラルネットワークの一種で、コホネンによって提案された「中間層の無い2階層型の教師無し競合学習モデル」^{12,13)}であり、感覚運動現象の脳へのマッピングを模したニューロンのネットワークモデルである。SOMのネットワークは、データを入力する入力層と、入力したデータを元にマップが形成される競合層の2層から構成されている。図3.4にSOMの基本的なネットワークの構造を示す。各層にはニューロンが存在し、入力層と競合層の全てのニューロンは結合されている。

SOMの主な特徴は、多次元の入力データの学習を行い、入力層と競合層が結合する際の結合重み（重み）を介して学習データが記憶される。入力データの類似度をニューロン間の結合重みとして検出することにより、似た特徴のある学習データどうしを2次元マップ上（競合層上）

で近くに配置することである。さらに、ラベリングにより分類基準を与えマップ（ラベリング図）を作成し、解析に使用する各入力データの結合重みより、入力データの関連性の把握が可能となる。

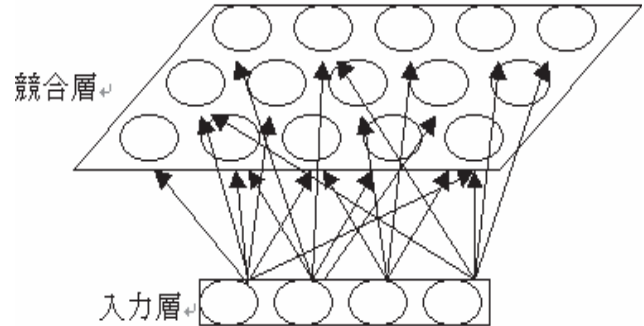


図3.4 SOMのネットワーク構造

(2) SOMの学習アルゴリズム

SOMの学習アルゴリズムの特徴^{12,13)}は、競合に勝ち残ったニューロンだけでなく、その近傍に位置するニューロンをも含めて集団で学習が行われることである。

(3) SOMによるクラスター分析

SOMによるクラスター分析（ウォード法）を行うにあたり、図3.2に示した17地点（観測点①~⑰）について表3.3に示す自然環境要因に地理・社会環境要因を加えて、学習項目は水深、照度下降割合、水温、pH、DO、COD、東西寄流れ、住宅（近岸の位置での有無）、地形（近岸）の特徴（防波堤、岸壁、砂岸、近岸無）、湾口部からの距離 [km]、河口部からの距離 [km]、最寄りの養殖場からの距離 [km]、水中光量（底層）、底質（粒径）、底質（シルト含有率）、底質（シルト+細砂含有率）、底層流速、シールズ数として、評価を試みた。

3.6 分析結果および考察

(1) SOMによるクラスター分析結果

クラスター分析の結果、当海域はAグループ（①②）、Bグループ（③⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑬）、Cグループ（④⑫⑭⑮⑯⑰）の3グループに分類された（図3.5）。Aグループは湾口部に近く、底質の粒径は中砂から細砂でシルト分が少ない海域であり、Bグループは対象海域のほぼ中央部に位置し、地点③⑦を除くとシルト分がかなり高く、Cグループは地点④を除き湾奥部に位置し、河口部に近い海域となった。アマモ有無によるラベリング図を図3.6に示したが、各グループにアマモの分布が見られ、クラスター分析結果との比較では、明確な類似性は見られなかった。そのため、各項目の重みマップとアマモの有無のラベリング図（図3.6）とを比較し、アマモの生育環境要因の分析を行った。明確に関係の見られた3項目について、図3.7（水深の重みマップ）、図3.8（水中光量（底

層)の重みマップ), 図 3.9 (底質の粒度の重みマップ) を示した. なお, 各重みマップの重みは灰色から白色のグラデュエーションで表示しており, 濃色ほど水深, 水中光量, 底質 (中央粒径) の各数値が大きいことを意味している. 図 3.7 よりアマモの生息域では, 白色または淡灰色の水深 5m 以浅の範囲でアマモが生息していた. 図 3.8 では, 濃灰色の範囲がラベリング図とよく一致しており, 地点⑦を除き水中光量が $1.56E/m^2$ 以上であれば生息が可能であることが示された. さらに, 図 3.9 においてアマモの生息域の重みがほぼ同一色 (中央粒径 $0.119\sim 0.654mm$) であった. 従って, この海域ではアマモの生育環境としては, 水中光量と底質の粒度の影響が大きいものと考えられた.

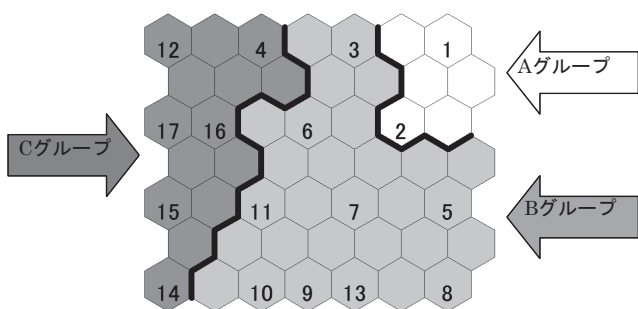


図 3.5 クラスタ分析結果 (太黒線が各クラスターの境界)

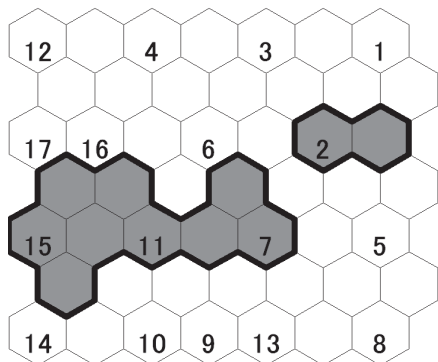


図 3.6 アマモ有無によるラベリング図 (太黒線内の色付マスがアマモの生息場)

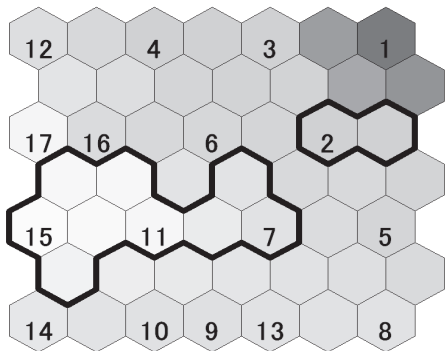


図 3.7 水深一重みマップ図 (太黒線内がアマモ生息場)

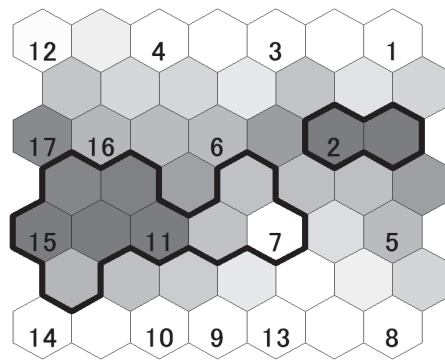


図 3.8 水中光量 (底層) 一重みマップ図 (太黒線内がアマモ生息場)

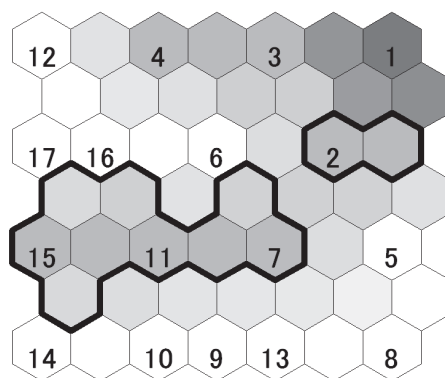


図 3.9 底質 (中央粒径) 一重みマップ図 (太黒線内がアマモ生息場)

(2) まとめ

半閉鎖性内湾である屋島湾におけるアマモの生育環境要因について SOM による評価・分析より, 以下のような結論を得た.

1) アマモの生育を制限する環境要因として考えられる流速は, 潮流の最強時で $0.3m/sec$ 以下であったことから, 湾内全体がほぼ静穏域であった. そのため, シールズ数と同様に単独での直接的な影響 (流れによる草体の流出など) は, ほとんどないものと考えられた.

2) 屋島湾におけるアマモの生育環境要因として水中光量, 底質 (中央粒径) の影響が大きいことが確認された. 底質のシルト含有率も表 3.1 に示した制限要因 (底質の 30%以下が生育限界値) と考えられたが, 屋島湾のアマモでは $2.6\sim 87.0\%$ まで実際に生育しており, 場所により生育限界値にも幅がかなりあることが考えられ, 屋島湾のアマモでは適応範囲の幅におさまっているものと推定された.

3) 水中光量 (底層) がアマモの分布に大きな影響を与えていると考えられたが, 湾奥部 (地点⑩) のように水中光量条件は好適であるが, 底質の粒径が小さくアマモが生息していない地点も存在し, 反対に地点⑦のように水中光量が低くとも, 底質の粒径, シルト含有率など他の

生育環境要因が作用することにより、アマモが生息している地点もあると考えられた。

4) 水深については、 -5m 以浅の地点でアマモの生育が観察されており、表 3.1 に示す生育限界値では -8m 以下とされているが、本調査の結果からは、屋島湾での影響度はそれほど高くなかった。これは、湾奥部などのアマモが分布していない地点で水深は浅いが、底質のシルト含有率が高かったことなどから、生育環境要因としての水深の関わりが明確に現れなかったものと考えられた。しかし、2010 年に行ったアマモの分布状況調査では、徐々にアマモの分布場所が沖方向へ拡大し、点在カ所も増加していた。これは底質の変化や水中光量の影響（改善）が考えられるため、今後も注意してモニタリングを行い、状況を把握する必要があると考えられた。

本章において、ニューラルネットワークの SOM（自己組織化マップ）を用いたアマモの生育環境要因の評価を試みた結果、各要因相互の定量的な関連性までには到っていないが、生育環境要因の複雑な関わりの一部について検証することができた。中でも生育水深、水中光量、底質、潮流の状況が重要なアマモ生育条件であると考えられ、これらがそろえば造成はうまくいく可能性が高くなるものと考えられた。しかしながら、アマモの生育環境はその海域毎で異なるため、造成を考える場所で現地調査を行い、アマモの生活サイクルとアマモ場の変遷に合わせた時系列環境データを加えながら評価・分析モデルに適用し、さらに検証していくことが必要である。また、アマモ生育環境要因の項目の絞り込みが重要であり、評価・分析および設計の効率化を促進するとともに、モニタリングの指標を簡素化することも重要な課題である。

力場の変化とアマモ分布条件の関係について。海岸工学論文集, 48, 156-1160.

- 7) 大本茂之・鳥井正也・間庭達也・国次純：2006, ニューラルネットワークによるアマモ場の分布制限要因の推定について。水産工学, 43(1), 1-8.
- 8) 森口郎彦・高木儀昌・仲宗根琢磨・吉川浩二・團昭紀・和泉安洋：1999, 分布特性の異なる 2 つのアマモ場における物理環境現地観測。水工研技報, 21, 1-12.
- 9) 川崎保夫・石川雄介・丸山康樹：1990, アマモ場造成の適地選定法。沿岸海洋研究ノート, 27, 136-145.
- 10) 白木渡・星野高士・井面仁志・川畑宏寿：2005, 海環境改善における藻場創生技術に関する研究。土木学会四国支部第 11 回技術研究発表会講演概要集, VII-5, 380-381.
- 11) 田中陽二・末永慶寛・河原能久・吉野文雄：2002, 瀬戸内海全域における海水流動の数値実験。土木学会四国支部第 8 回技術研究発表会講演概要集, 101-102.
- 12) T.コホネン：1996, 自己組織化マップ。徳高平蔵・岸田悟・藤村喜久郎訳, シュプリンガー・フェアラク東京株式会社。
- 13) T.コホネン：1995, 自己組織化と連想記憶。中谷和夫監訳, シュプリンガー・フェアラク東京株式会社。

参考文献 <第 3 章>

- 1) 財団法人港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所：1998, 港湾構造物と海藻草類の共生マニュアル（運輸省港湾局監修）。財団法人港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所, 東京, 21-23.
- 2) 国土交通省港湾局：2003, 海の自然再生ハンドブック。第 3 巻 藻場編, 4-67.
- 3) マリノフォーラム 21 海洋環境保全研究会 浅海域緑化技術開発グループ：2001, アマモ場造成技術指針。
- 4) 森田健二・竹下彰：2003, アマモ場分布限界水深の予測評価手法。土木学会論文集, 741/VII-28, 39-48.
- 5) 島谷学・中瀬浩太・熊谷隆宏・月舘真理雄：2000, アマモ種子没機構に関する研究。海岸工学論文集, 47, 1171-1160.
- 6) 島谷学・中瀬浩太・中山哲徹・太田雅隆・星野高士・内山雄介・灘岡和夫：2001, 人工リーフ設置による外

第4章 消波離岸堤背後域での播種・移植アマモの長期変動

4.1 はじめに

第1章でも述べたように、香川県海域のアマモ場面積は、戦前10,000ha程度あったとされるが、1971年には1,384ha、1996年には891haまで減少した。干潟とそれに続く浅海域は、海面埋め立ての絶好の適地であるため、香川県四国本土側の沿岸部では工業用地として埋め立てが進み、多くのアマモ場が消失した。アマモ場の再生を目指して香川県沿岸部で試みられてきたアマモ場造成試験^{3,4)}では、同地の海面が北方向へ開いているために冬季の北西方向からの季節風による波浪の影響が制限要因となっている。また波浪の影響を回避する場合には、光量が制限要因となる水深がやや深い場所を試験地として選定せざるを得ず、アマモの生育には困難が伴っていた。そのため、水深が浅く、かつ静穏域な場所について検討を行い、海岸沿いの浅海域に海岸の侵食防止、道路や人家を風浪から防御するために設置されている消波離岸堤の背後域には、小規模ながら人工的な静穏域が形成されていることに着目し、アマモの播種・移植を行った。

本章では、比較的水深が浅い場所で光量が豊富であり、波浪の影響が軽減されているという条件を満たす消波離岸堤背後域（以下、「離岸堤背後域」とする）にアマモを播種・移植し、アマモの減耗要因やアマモの生長と成熟の特徴を把握し、比較的波浪の影響が大きな地先におけるアマモ場の造成技術の開発につなげることを目的として調査研究を行なった。

4.2 調査場所の概要と調査方法

瀬戸内海東部、備讃瀬戸と播磨灘の境界域付近にあたる香川県さぬき市津田地先（図4.1）は、沖合いでは潮汐流がやや速いが、沿岸域ではやや停滞する特性を持つ。同地先は、20km沖合いに小豆島があるものの北東方向に海面が開いており、播磨灘からの冬季の強い季節風による波浪や台風時にはしばしば背後の人家が高潮、越波

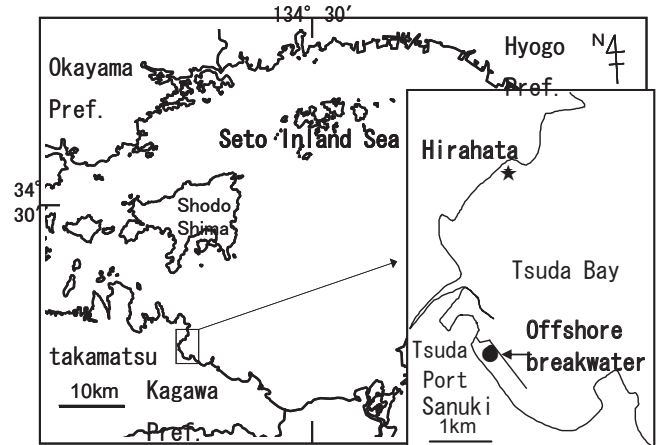


図4.1 試験調査場所（香川県さぬき市津田地先）

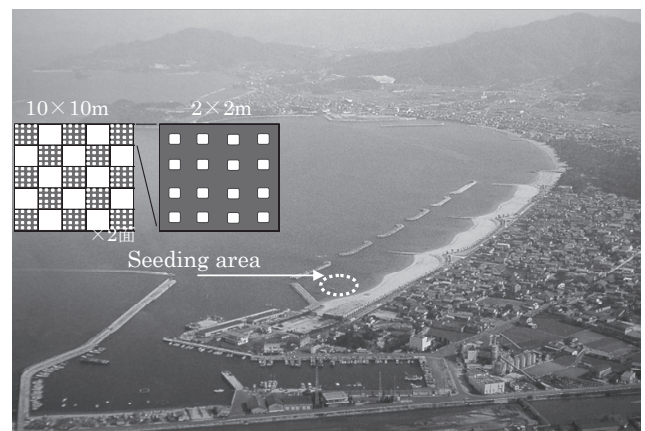


図4.2 離岸堤背後域での1997年12月播種試験区の位置（図4.4のB区と同一）

により被害を受けた。そのため、同地先では、防災（海岸の侵食防止、消波）の目的で1989年から1997年にかけて砂浜の地先に消波離岸堤（図4.2）が建設された。

試験に使用したアマモ種子については、毎年5月中下旬に高松市生島湾の多年生アマモ場から花枝を採集し、香川県水産試験場内の陸上水槽（流水、1回転/日、通気有り）で追熟させたものを回収して使用した。12月頃に

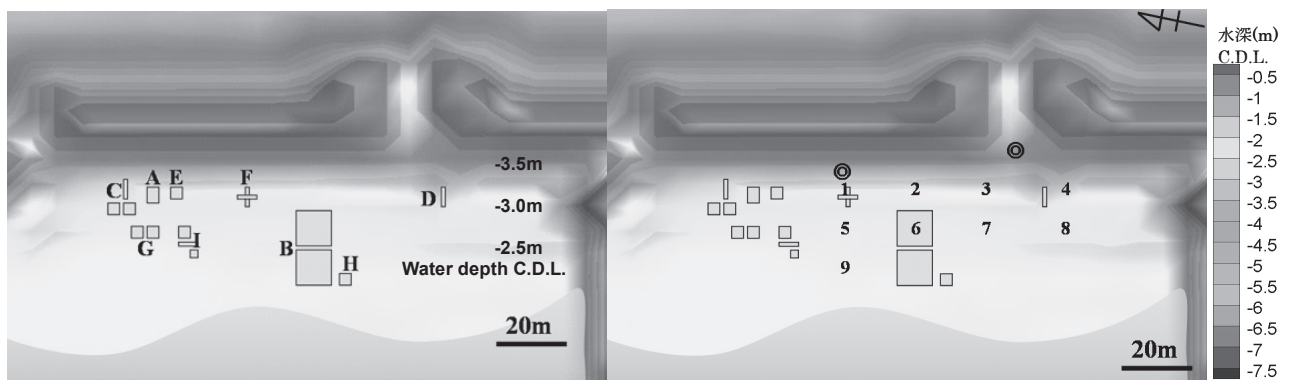


図4.4 各年度のアマモ播種移植試験区の位置（左図：A～I地点）、粒度組成調査点（右図：1～9地点）およびメモリ式電磁流速計設置場所（◎：離岸堤背後域中央部と開口部の2ヶ所）。

アマモ種子約100粒および海砂100mlをよく混合したものを、あらかじめ作成しておいた15×13cmのガーゼ袋に詰め、アマモ種子が入ったガーゼ袋（以下、種子入りガーゼ袋）を作成した。この種子入りガーゼ袋を海底面に3cm程度のくぼみをつくり、移動しないようにダイバーが配置して播種を行った。また、株移植については、近隣のアマモ場から栄養株を採取し、紙製の園芸用ポット（商品名：ジフィーポット）に海底の砂泥とアマモ草体を3～5株入れて作成し、種子入りガーゼ袋と同様の方法で移植した。この手法は、従来から香川県水産試験場で実施しているものである⁵⁾（図4.3）。実施した播種移植試験の中で、1997年12月に離岸堤背後域のほぼ中央部の海底（C.D.L.-2.5m）に10×10mの播種試験区（2×2m枠を25区）を2面設定し、格子状に播種区を配置した。播種区の1区内に種子入りガーゼ袋を16袋（4×4列）配置し、計約41,600粒（13区×16袋×約100粒×2面）を播種した（図4.2、図4.4のBの位置）。1996年～2002年まで播種と移植を行った試験位置と内容について図4.4、表4.1に示した。

播種後は、2001年度までは基本的に1ヶ月に1回、2002年度以降では2ヶ月に1回、2008年度以降は4ヶ月に1回程度の頻度でスキューバ潜水により、播種移植

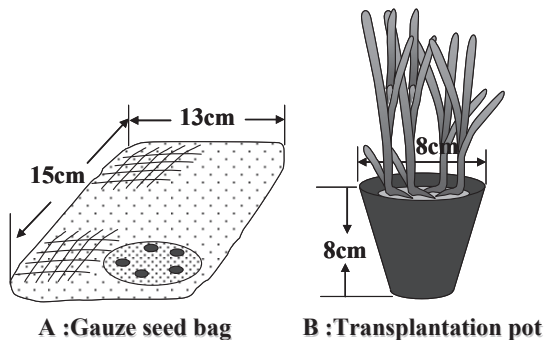


図4.3 アマモ種子入りガーゼ袋と株移植用ポットのイメージ図

による造成試験区内の5区（図4.4、表4.1の試験区B～F）についてアマモ栄養株と花枝の株数の計数と30株程度の草丈を測定した。また、不定期ではあるが試験区Bと試験区全体のアマモの広がりについて、スキューバ潜水と船上目視による観察から、大まかな分布状況を調査した。

試験開始当初の1996年1月から1998年6月には、試験区に隣接するさぬき市平畑地先（図4.1）の天然アマモ場（天然区：約0.4ha、分布水深D.L.-0.4m～-2.6m、測定は-1.5m）についても比較のため、モニタリング調査を実施した。

また、離岸堤背後域の流向流速状況を知るために背後域中央部と離岸堤と離岸堤の間の開口部（以下、「離岸堤開口部」とする）の2ヶ所（海底面からは50cm程度の高さに設定）にメモリー式電磁流向流速計（JFEアドバンテック社製：MODEL：AEM-USB）を設置し測定を行なった。測定期間は、2010年2月12日（大潮）～3月1日（大潮）までの18日間とした。

あわせてアマモ播種・移植試験を開始した1996年7月16日に離岸堤背後域の中央部付近で2点（詳細な場所は不明）、2010年1月27日に図4.4に示した背後域の9点で採泥（表層5～7cm厚）を行い、粒度組成を分析した。

4.3 天然区および播種・移植試験区における調査結果

(1) 天然区

平畑地先の天然アマモ場は、1996年1月から1998年6月までの期間中、株密度、平均草丈とも毎年ほぼ同様に推移した（図4.5）。株密度は、1～4月に増加し、5～7月に最大（89～109本/m²）となり、8月頃から減少し始め、11月に最低（12～39本/m²）となった。平均草丈は、花枝が最大となる6～7月に85.0～98.2cmと最大になり、多くの株で草丈が短くなる秋季から実生株が加入する冬季に27.2～31.2cmと最小になった。

表4.1 各年度の播種・移植試験区の内容

| Experimental section | Method | Transplant timing | Number | Area | Area size |
|----------------------|-----------------|-------------------|----------|--------------------|-----------------------|
| A | Transplantation | Dec.1996 | 48 pots | 12 m ² | 3×4m |
| B | Seeding | Dec.1997 | 416 bags | 200 m ² | 10×10m×2 sections |
| C | Seeding | Nov.1998 | 100 bags | 23 m ² | 3×3m×2 sections, 1×5m |
| D | Transplantation | Mar.1999 | 30 pots | 2 m ² | 1×5m |
| E | Seeding | Nov.1999 | 100 bags | 9 m ² | 3×3m |
| F | Transplantation | Feb.2000 | 76 pots | 9 m ² | 1×9m |
| G | Transplantation | Feb.2001 | 228 pots | 18 m ² | 3×3m×2 sections |
| H | Seeding | Dec.2001 | 200 bags | 16 m ² | 4×4m |
| I | Seeding | Dec.2002 | 500 bags | 30 m ² | 2×3m, 2×10m, 2×2m |

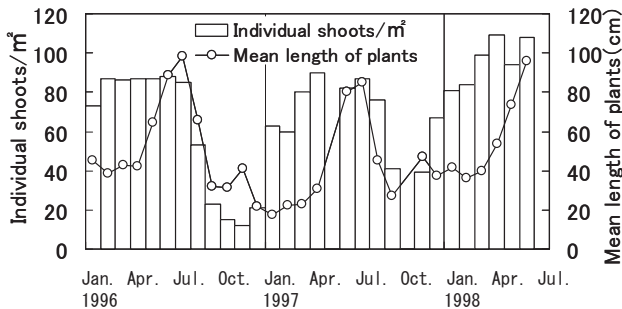


図 4.5 平畑地先の天然アマモ場の季節的な推移

(2) 播種・移植試験区

播種・移植したアマモの季節的消長

播種・移植による試験区内の 5 区 (B~F) について、アマモの株数と平均草丈の推移を図 4.6 に示した。

データとして最も長い 1997 年 12 月に播種した群 (図 4.6 の B 試験区) の株密度を詳しくみてみると、1998 年 10 月には 2.8 本/m²であったが、冬季から春季に増加して秋季に減少するという季節的な増減を繰り返しながら徐々に増加し、2000 年 7 月に 70.4 本/m²で最高となった。特にアマモ衰退期の 1998 年秋季、2001 年秋季、2002 年秋季、2004 年秋季には急激な株密度の減少が確認された。花枝の形成は、播種後 1 年目の 1998 年には観察されなかった。多年生のアマモを播種した場合、発芽した年の春には花枝を形成せず、2 年目以降で花枝が形成された。試験区 B~F の花枝形成率について表 4.2 にまとめた。最大平均草丈は、花枝が最大となる 6~7 月頃の 53.0~140.4cm であった。平均草丈が最小になるのは、天然区と同様に秋季から冬季であり、調査期間中では 18.7~36.3cm であった。1998 年 10 月には生育しているアマモのほとんどが刈り取られたように短くなり、草体には魚類による噛み跡が多数観察され、平均草丈は 7.2cm (3~11cm) 程度となった。

播種・移植試験区全体では、アマモ株密度の急激な減少の理由として大きく 3 つのパターンに分類された。

①他生物の過剰摂食: アイゴ (*Siganus fuscescens*) によると考えられる食害は、1998 年だけではなく 2007 年にも試験区 C と E で観察された。

②他生物の堆積: 2002 年秋冬季には、離岸堤背後域の広範囲で、多量の浮遊性アオサ (*Ulva pertusa*) が堆積 (堆積厚 30cm 程度) した。播種試験区のアマモ栄養株上にも浮遊性アオサは堆積して栄養株の密度は減少し、実生株も浮遊性アオサに覆われてしまい、色素が抜け落ちて枯死した個体が多数観察された。各年で規模は様々ではあるが、フクロノリ (*Colpomenia simuosa*)、マメダワラ (*Sargassum piluliferum*) といった海藻類の堆積もしばしば観察された。特に離岸堤背後域中央部の試験区 F では 2004 年冬季にアオサ、フクロノリの堆積が多く、ア

マモは消失した。

③波浪による砂面移動: 2001 年、2003 年、2004 年は台風が多く試験区 F を除く B~E 試験区で、台風による厳しい波浪や砂面の変動によるアマモへの直接的なダメージが確認され、試験区 D は 2003 年 8 月に固定枠ごと消失した。

播種・移植したアマモ場のひろがり

1997 年播種群 (図 4.6 の B 試験区) の面積のひろがりについて図 4.7 に示した。2003 年 7 月時点では播種試験区 B (10×10m) の範囲内でわずかに拡大したが、試験区から外側へはほとんどひろがっていなかった。2009 年 7 月以降では全体に株密度は少なくなったが、年数を経るにつれて徐々に全体に広がっていく傾向が確認された。

播種・移植試験区全体のアマモの生育域のひろがりについて図 4.8 に示した。2003 年 7 月では、アマモは播種移植した場所からそれほど大きく拡大してはいなかった。離岸堤背後域中央部付近には、フクロノリ、浮遊性アオサ、マメダワラ等の寄り藻が広範囲に堆積していた。2009 年 7 月では、アマモはかなり広範囲に拡大したが、前述のとおり試験区 D と F の 2 箇所のアマモは消失した。離岸堤背後域中央部やや深い場所には浮遊性のマメダワラが堆積し、浅い場所のアマモ場の周辺には浮遊性のフクロノリとアオサ、ハスノハカシバン (*Scaphechinus mirabilis*) がアマモ場周辺に多く分布していた。当初の播種移植区からはかなり移動し、株密度は少なくなったが全体に広がっていた。アマモ場面積の拡大の速さは年により様々であるが、おおよそ 20~50cm/年程度であった。

離岸堤背後域の粒度分布

離岸堤背後域の粒度分布の分析結果を表 4.3 に示した。1996 年の分析と同じく中砂が全体の 80%程度をしめる粒度組成であった。また、2010 年 1 月時点で粒径の小さいシルトと細砂をあわせた合計値の割合の分布状況を図 4.9 に示した。粒度分布を平面的にみると、離岸堤開口部ではシルトと細砂の合計値の割合は少なく、離岸堤背後中央部にむかうほどその割合は増加していた。

離岸堤背後域の底層流況

メモリー式電磁流向流速計により測定した流速の結果を図 4.10 に示す。離岸堤開口部では、平均流速 1.8cm/s、最大流速 5.9cm/s であり、離岸堤背後域中央部では平均流速 1.1cm/s、最大流速 3.3cm/s であった。離岸堤開口部の流向は、海水の出入りに伴う 2 方向が卓越していた。離岸堤背後域中央部では離岸堤に沿う流れであった。

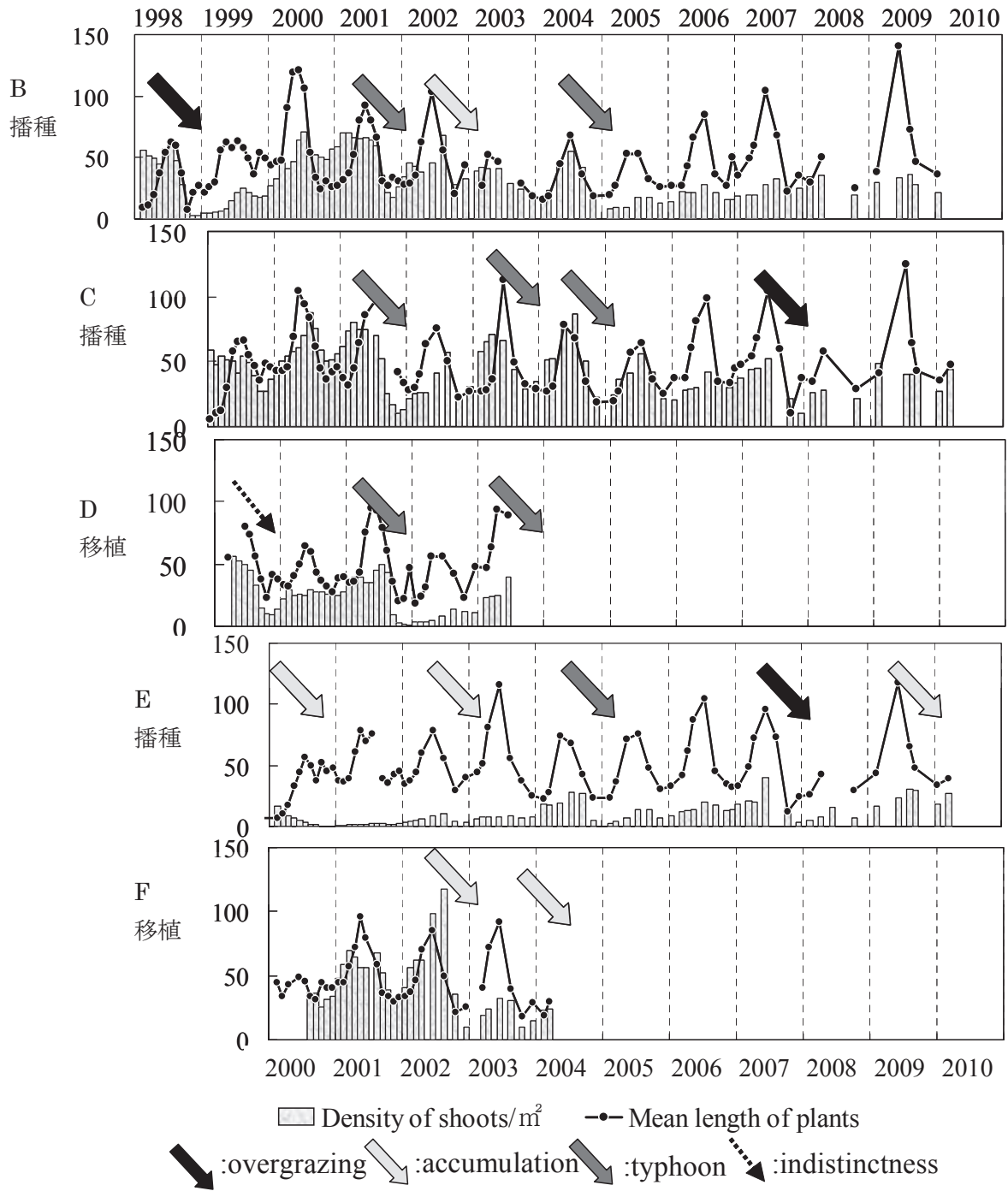


図 4.6 播種移植試験区のアマモの株密度と草丈の推移

表 4.2 観察した試験区 B~F での花枝形成率 (%) の推移

| experimental section | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| B | 0.0 | 2.3 | 20.8 | 19.0 | 16.6 | 12.2 | 3.1 | 9.7 | 11.2 | 6.4 | 5.8 | 9.1 |
| C | | 0.0 | 20.2 | 15.5 | 8.4 | 13.1 | 2.1 | 6.9 | 5.6 | 11.3 | 12.9 | 23.4 |
| D | | 25.0 | 28.0 | 28.6 | 20.0 | 25.0 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| E | | | 0.0 | 7.7 | 19.6 | 12.9 | 2.3 | 6.8 | 5.7 | 9.5 | 8.3 | 14.6 |
| F | | | 6.3 | 35.7 | 17.7 | 16.7 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

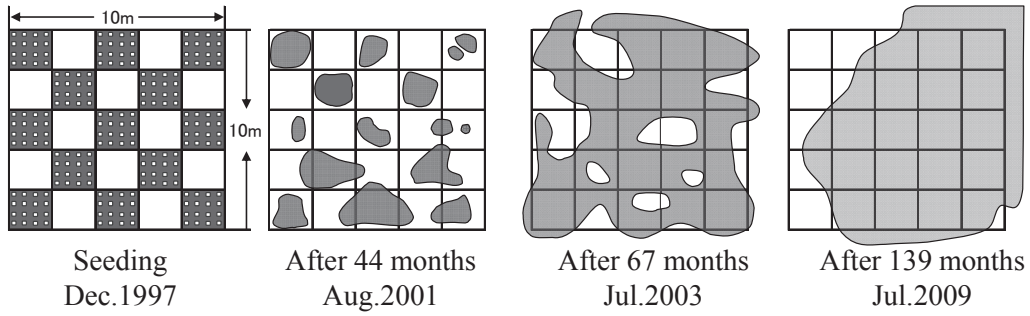


図 4.7 1997年12月に播種した試験区Bからのアマモ生育域のひろがり

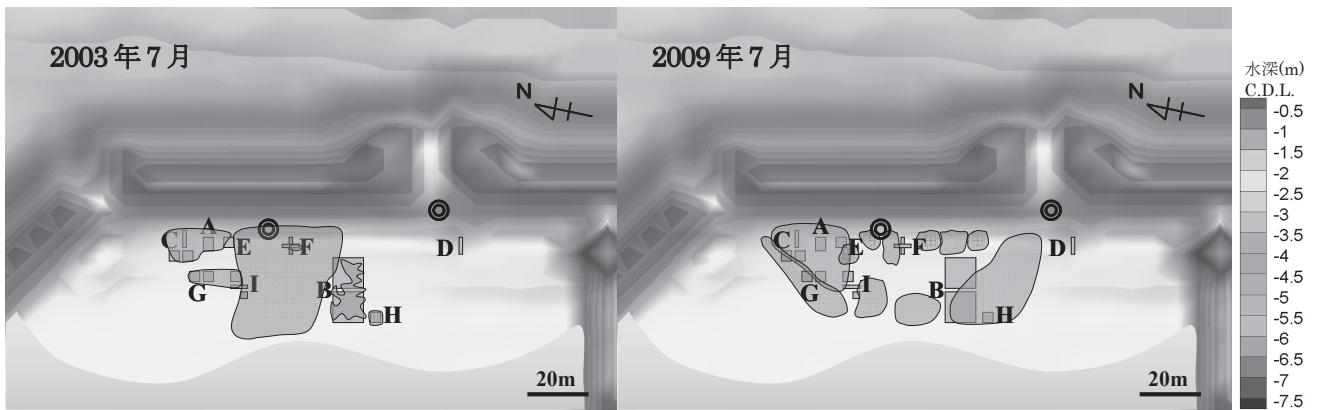


図 4.8 播種・移植試験区全体の離岸堤背後域でのアマモ生育域のひろがり
図中の枠内(無地)にアマモ, 枠内(斜線)に他の海藻(アオサ, シオミドロ, マメダワラ等)が分布.

表 4.3 離岸堤背後域における粒度組成の状況 (1996年に実施した粒度組成含む)

| 分類 | | 2010 | | | | | | | | | 1996 ave. |
|-----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| 礫 | % | 0.1 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.0 |
| 粗砂 | % | 2.3 | 3.3 | 4.5 | 2.5 | 2.9 | 2.9 | 3.0 | 1.8 | 5.1 | 4.6 |
| 中砂 | % | 67.8 | 75.7 | 87.0 | 81.4 | 80.8 | 78.5 | 85.3 | 76.1 | 80.9 | 78.5 |
| 細砂 | % | 17.0 | 12.6 | 2.9 | 8.6 | 9.2 | 10.8 | 5.2 | 15.0 | 7.9 | 14.8 |
| シルト | % | 12.8 | 8.0 | 5.3 | 7.1 | 7.1 | 7.6 | 6.4 | 7.0 | 5.8 | 2.1 |
| 中央粒径 (mm) | | 0.346 | 0.396 | 0.488 | 0.386 | 0.405 | 0.392 | 0.446 | 0.345 | 0.445 | N.D. |

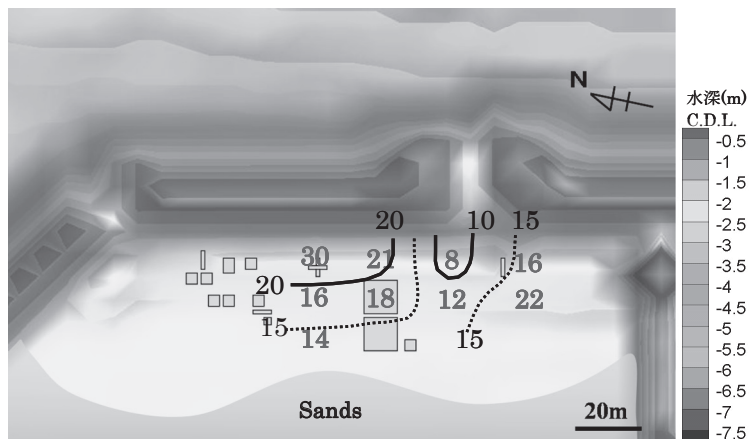


図 4.9 離岸堤背後域における細砂とシルトの合計値の割合の分布状況 (2010年1月)

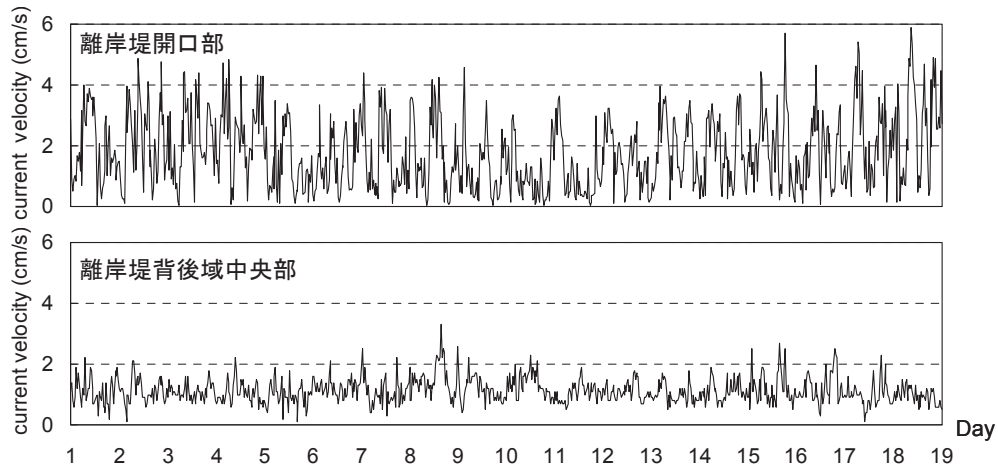


図 4.10 離岸堤背後域の流速測定結果
(上図：離岸堤開口部，下図：離岸堤背後域中央部，測定は 2010.2.11～3.2)

4.4 考察とまとめ

離岸堤背後域という人工的な静穏域に播種・移植したアマモは、1997 年 12 月から 2010 年 2 月まで 12 年以上にわたり継続して生育し、株数、平均草丈ともに天然区と同様の季節消長を示した。離岸堤背後域でのアマモの分布状況は、季節的な増減を繰り返しながら、その場所の環境にあった形状になっていった。ここではモニタリング期間中に播種試験区で観察されたアマモ株密度の著しい減少の要因について整理を行った。

1998 年、2007 年秋季には、株密度の減少だけでなく、草丈も広範囲にわたり一様に短くなり、噛み跡の観察から、アイゴ等の植食性魚類による過剰摂食の影響^⑩と推察された(写真 4.1F)。

2001 年夏季、2003 年夏季、2004 年秋季には、大型台風(台風 0111 号：8 月下旬，台風 0310 号：8 月上旬，台風 0421 号：9 月下旬，台風 0423 号：10 月下旬)が試験区の東側を通過したため、北東方向からの強い波浪にさらされ、試験区では急激にアマモ株密度が減少した。同時期、同じ播磨灘海域(徳島県海域)で行われていた徳島県でのアマモ生育試験^⑦でも同様に株密度の著しい減少が確認された。特に 2001 年と 2004 年の大型台風の波浪は、津田地先の消波離岸堤の一部を倒壊していくほど、極めて強いものであった。また、2004 年の台風の影響により、備讃瀬戸海域(香川県海域)の直島地区で行われていたアマモの生育試験^⑧でも、移植試験区および近隣の天然アマモ場(約 5ha)が消失した。このように、大型台風の進路によっては、強烈な波浪が生じ、静穏域である離岸堤背後域にも大きな影響を与え、アマモが消失しないまでも、砂面の変動^⑨やアマモ草体に直接大きなダメージを与えていた(写真 4.1A)。

2002 年秋季に試験区 B では、多量の浮遊性アオサの被覆によるアマモの生育への悪影響^⑩が観察された。また、離岸堤背後域の中央部付近の試験区 E、F では、浮遊性

アオサ以外にも、年により種や量に違いはあるが、フクロノリ、マメダワラ、シオミドロ(*Ectocarpus spp.*)等の寄り藻の漂着・堆積によっても同様の現象が数回観察された。海藻類の堆積以外にも、水深のやや浅い場所(C.D.L. -1.0～-3.0m 付近)では、毎年アナジャコ(*Upogebia spp.*)の巣穴やハスノハカシパン(*Scaphechinus mirabilis*)がかなり多く観察されており、これらもアマモの生育域の面的なひろがりやを阻害していることが考えられた(写真 4.1B～写真 4.1E)。

離岸堤背後域の環境をみてみると、アマモの生育に適した底質は、粒径 0.5mm 以下の砂泥質^⑪であり、今回研究を行った離岸堤背後域は、中砂が主体(0.25～0.5mm)で中央粒径 0.345～0.488mm であり、アマモの生育条件として制限要因にはなっていなかった。しかし、2004 年度以降大きな台風がきてないことから、周囲の環境はかなり安定した状態であると考えられる。2010 年の底土の粒度組成結果をみると、流れが弱い離岸堤背後域中央部を中心に細砂とシルトの割合が多かったのと同様に、アマモ草体の上にも多くの浮泥が堆積していた(写真 4.2)。このようなアマモ葉上への過度の浮泥の堆積は、光合成阻害を誘発^⑫し、離岸堤背後域中央部ではアマモが生育しにくい環境になっているものと考えられた。実際のアマモの分布状況と照らしあわせると、最大流速で 6cm/s 程度の流れがあり、草体が定期的に揺らされて草体上の浮泥が振り落とされるであろう離岸堤開口部と風波の影響により水の移動・攪乱が起りやすい浅い場所が、離岸堤背後域でのアマモ生育適地になっていると考えられた。また、離岸堤間から入射する回折波によって生じる循環流により、離岸堤背後域中央部に寄り藻やその他の生物も漂着・堆積しやすく、なかなか外部に流失しにくい状況にあることも大きな要因として考えられ、現在のアマモの分布状況は、このような離岸堤背後域の環境をよく現していると考えられた。

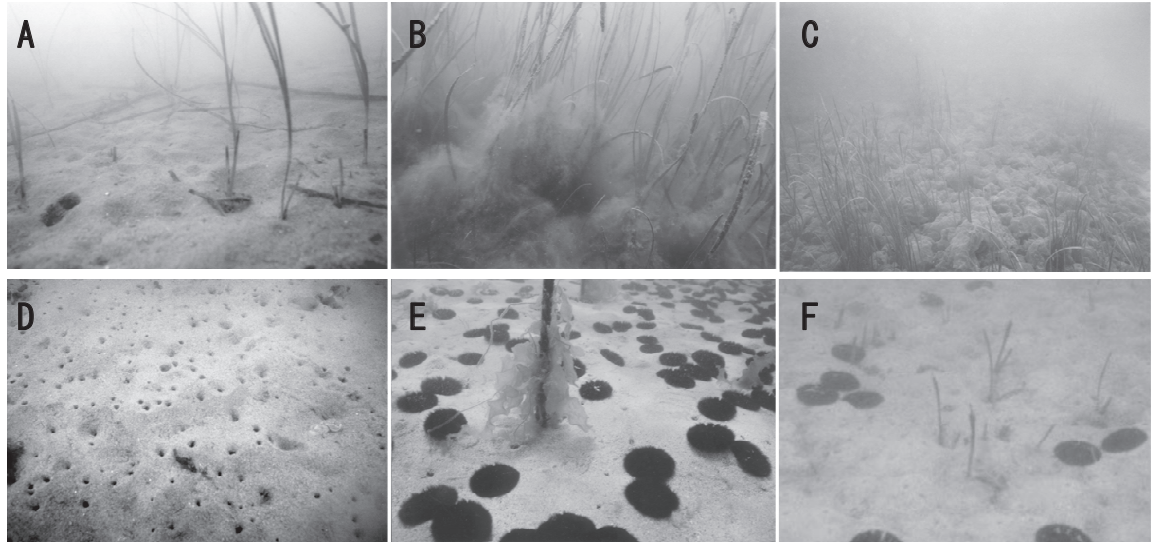


写真 4.1 アマモ株数の減少に影響を与えていると考えられた事象

A: 台風通過直後のアマモ, B: 堆積したシオミドロ, C: 堆積したフクロノリ, D: 海底一面のアナジャコの巣穴, E: 海底一面のハスノハカシパン, F: アイゴによる過剰摂食

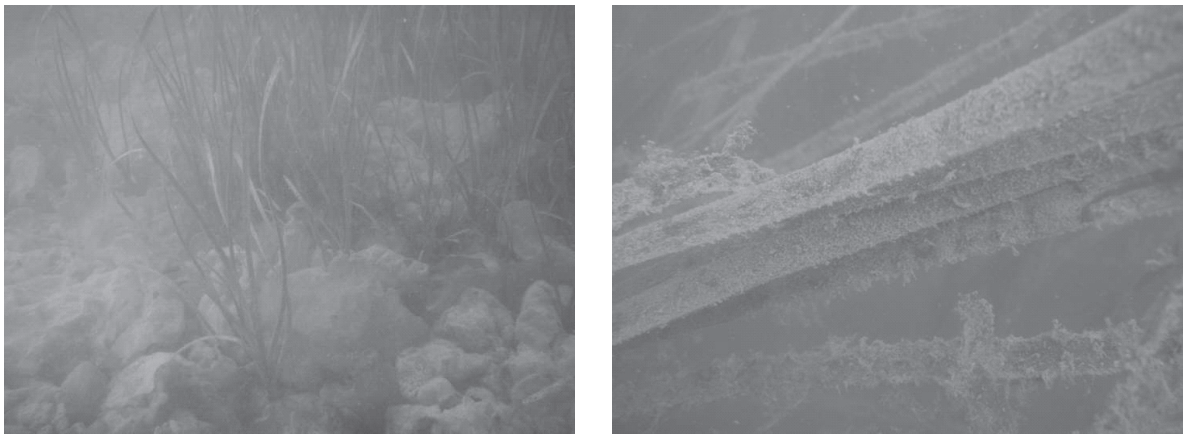


写真 4.2 離岸堤背後域中央部でみられるアマモとアオサの生育場所の競合（左写真）とアマモ上に堆積する浮泥および付着珪藻（右写真）

以上のことから、本地先の離岸堤背後域は、静穏域ではあるものの離岸堤背後域中央部は浮泥や浮遊性アオサなど寄り藻が堆積しやすく、かつ流出しにくく、また、他の競合底生生物類も盛んに増殖し、近隣の天然アマモ場よりもアマモの生育にとって厳しい条件であることが推察された（写真 4.2）。加えて、備讃瀬戸海域では 1990 年代後半から冬季の水溫上昇傾向と高水溫日数の増加が確認されている¹³⁾ため、アマモの生育上限水溫とされる 8 月の平均水溫 28℃¹⁴⁾を越える高水溫期の増加等も予想されるので、これらの要因も視野に入れてアマモ場造成を検討する必要がある。

今後は、本地先の波浪条件や地形条件、底質条件等のデータを取得・整理して、消波離岸堤背後域の波浪場や流況場を定量的に評価することで、消波離岸堤による波浪の減衰効果や循環流の影響を把握する必要があると考えられた。

参考文献 <第 4 章>

- 1) 山賀賢一・藤原宗弘：1998, 藻場分布および消滅状況調査. 平成 8 年度香水試事報, 108-114.
- 2) 川崎 健・平野敏行・嶋津靖彦：1997, 面埋め立てと環境変化. 恒星社厚生閣, 1-191.
- 3) 下川千代照：1994, 燧灘海域におけるアマモ場造成試験の総括. 南西海区ブロック藻類研究会誌第 14 号, 48-55.
- 4) 藤原宗弘・山賀賢一：2005, 藻場造成技術開発試験. 平成 15 年度香水試事報, 74-77.
- 5) 山賀賢一・藤原宗弘：1999, 藻場造成技術開発試験. 平成 9 年度香水試事報, 86-88.
- 6) 寺脇利信・玉置 仁・西村真樹・吉川浩二・吉田吾郎：2002, 広島湾におけるアマモ草体中の炭素および窒素総量. 水研セ研報, 4, 25-32.

- 7) 棚田教生・和泉安洋・團 昭紀・広沢 晃・守口朗彦・寺脇利信：2005, 冬季波浪条件の比較的厳しい海域におけるガーゼ・礫製マットによるアマモ繁茂への効果と限界. 水産工学, 42(2), 129-134.
- 8) 藤原宗弘・山賀賢一：2006, 藻場造成技術開発試験. 平成 16 年度香水試事報, 69-72.
- 9) 平岡喜代典・高橋和徳・中原敏雄・寺脇利信・岡田光正：2000, 移植実験によるアマモの生育制限要因の検討. 環境科学会誌, 13, 391-396.
- 10) Sugimoto K, Hiraoka K, Ohta S, Niimura Y, Terawaki T, Okada M : 2006, Effects of Ulvoid (*Ulva spp.*) Accumulation on Formation of Eelgrass (*Zostera marina L.*) Bed. Journal of Japan society on water environment, 29(5), 269-273.
- 11) Arasaki S : 1950, Studies on the ecology of *Zostera marina* and *Zostera nana* (1), The Japanese Society of Fisheries Science, Journal of Fisheries Science, 15, 567-572.
- 12) Tamaki H, Nishijima W, Arai S, Terawaki T, Okada M: 1999, Shading Effect of the Deposition on Leaves on the Survival of Eelgrass (*Zostera marina L.*) in Hiroshima Bay. Journal of Japan society on water environment, 22(8), 663-667.
- 13) 山本昌幸：2003, 瀬戸内海中央部の備讃瀬戸における水温と塩分の長期変動. 水産海洋研究, 67(3), 163-167.
- 14) 水産資源保護協会：1992, アマモ類, 環境が海草類に及ぼす影響を判断するための「判断基準」と「事例」. 水産資源保護協会, 38-47.

第5章 消波離岸堤背後域におけるアマモ種子（花穂）の移送機構の解明

5.1 はじめに

本研究の対象海域でもある香川県さぬき市津田湾では、1997年～2002年に離岸堤背後域に播種したアマモ場が現在も生育を続けており、瀬戸内各府県のアマモ場造成試験における先進事例の一つとなっている。しかしながらこの海域では、アマモ場の生育適地はゆるやかにしか拡大しておらず、部分的に衰退することも指摘されている^{1,2)}。しかし、ここは造成試験後12年以上にわたってアマモの生育が確認されているため、光量に関してはアマモの生育環境下にあるといえる。そこで、波浪が海岸構造物周辺のアマモ場に与える影響を評価した研究は少ないことから、海岸構造物周辺における潮流による流況を把握することによって、静穏域を維持できる場所を特定できれば、今後のアマモの生育場拡大につながるひとつの指標として評価できると考えられた。

そこで本章では、離岸堤周辺のアマモ場造成適地を評価し、今後の生育場拡大に向けた検討を行うことを目的とする。具体的には、造成適地の判定については、離岸堤周辺の流動場の計算について3次元マルチレベルを用いた数値シミュレーションモデルを構築し、潮流によるアマモの花穂と種子（以下、「アマモ種子」とする）の移送機構を解明する。数値計算による波浪の解析については、多くの研究で用いられている手法であるが、従来のモデルでは、対象領域における構造物と海洋との境が極端であり、本研究のような狭い対象海域では精度の高い潮流解析を行うことができなかつた。そこで、数値計算の際には、従来の手法よりも精度を向上させるために離岸堤周辺の海底勾配を考慮した詳しい地形モデルを適用することで、対象海域の流動場を精度よく再現する。この結果をもとに、離岸堤背後域でのアマモ種子の滞留状況を定量的に評価し、アマモ造成適地選定技術の開発および造成方法の検討を行う。

主な研究手順について以下に示す。

(1) 対象海域における海底地形データの収集

対象海域における地形データについては、香川県長尾土木事務所設計の津田港平面図を使用した。この平面図をもとに対象海域を縦50×横70の3,500メッシュに分割し、各メッシュの水深をデータ入力し、Tecplot 360 (Tecplot, Inc) を用いて立体的な海底地形図を作成した。

(2) 対象海域におけるアマモ場生息状況データの収集・現地調査

対象海域のアマモ場生息状況については、既存の資料¹⁻³⁾を基にした。また、現地調査では、実際のアマモ生育場所、離岸堤の形状、配置状況、対象海域周辺環境を把握し、モデル化した地形データの評価を行う。

(3) 数値計算

3次元マルチレベルモデルを用いた潮流計算およびオイラー・ラグランジュ法によるアマモ種子粒子の追跡計算を行う。追跡計算を行う上で物質の輸送に影響を与えるものとしては、潮汐・風・海流等が挙げられる。特に本研究では、離岸堤周辺の流動場を精度よく再現することを目的としており、風を考慮せずに駆動力を潮汐流のみとして計算を行う。

(4) 数値計算の整合性評価

数値解析で求めた潮流と実際の対象海域との整合性を評価するため、既存の資料等から津田湾の潮流を求め、評価する。

5.2 対象海域の概要と造成アマモ場

本研究の対象海域は、播磨灘南西部に面するさぬき市津田湾沿岸域である。さぬき市津田のふるさと海岸の沖に配置してある消波離岸堤7基のうち赤点線で囲った領域を対象としている（図5.1）。離岸堤は、1基約100m程度で中空三角ブロックが積み上げられてできている（写真5.1）。現在、北西側から2番目の離岸堤背後域で造成したアマモが12年以上、継続して生育している¹⁾。

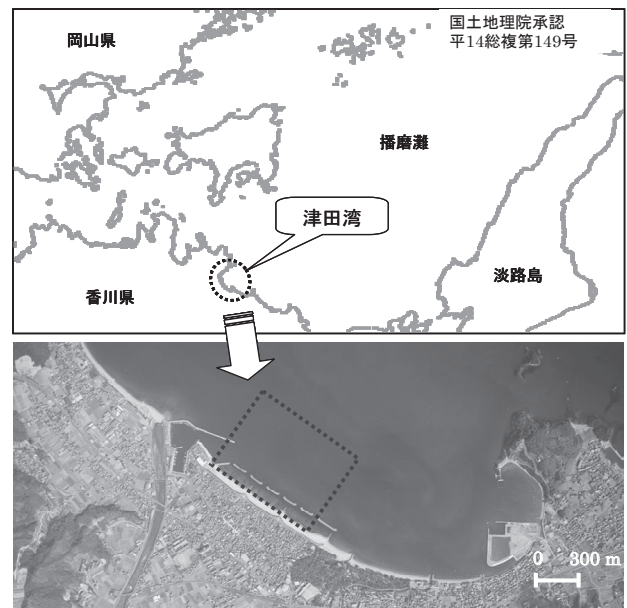


図5.1 研究対象海域（播磨灘と香川県さぬき市津田湾）



写真5.1 離岸堤配置状況

図 5.2 に対象海域のアマモ場造成試験位置の概略を示した。この場所のアマモ場の特徴については第 4 章で示したとおりである。現在のアマモ場は、季節的に増減を繰り返しながら、緩やかに増加している。離岸堤背後域は静穏域ではあるが、その中央部は特に過剰な静穏域となり、アマモ草体上や海底への浮泥の堆積が多いことや、他の生物（寄り藻や競合種）が多いことから、あまりアマモの生育に適さない場所となっている可能性が示された。

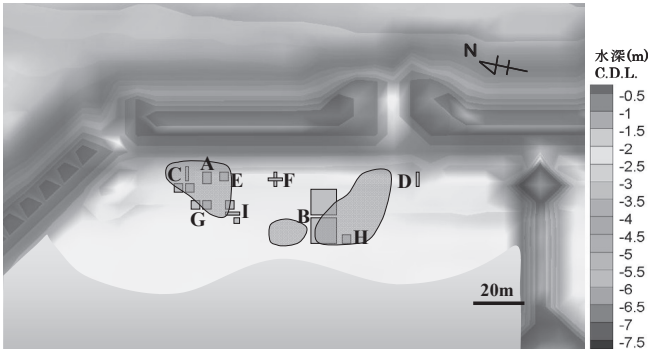


図 5.2 造成試験当初と現在のアマモ場生育状況²⁾
図中の枠内（無地）にアマモが分布，四角枠内が播種移植場所。

5.3 理論計算

(1) 基本仮定

海洋のように複雑かつダイナミックに変化する物理現象の把握には、その構造について仮定や近似を施す必要がある。まずここでは、本研究で用いる基礎方程式を導入するにあたって用いた基本仮定を示す。

1. 海域の流れを駆動する要因は、潮汐、密度傾度、沿岸からの河川水流入および海上を吹く風の応力である。
2. 流体は回転地球上的非圧縮性粘性流体として扱う。
3. f-平面近似として、計算領域におけるコリオリ係数を一定にする。
4. 潮流流のような長周期波の流れであり、鉛直流がほとんどないため鉛直方向には、静水圧近似を行う。つまり、z 方向の運動方程式の圧力項が常に釣り合っているものとして考える。
5. 密度と水温および塩素量の関係式(状態方程式)としては、Knudsen の式を用いる。
6. 鉛直方向の層区分は図 5.3 に示されるように行い、各層で平均化された諸状態量（速度、温度、塩素量など）を予測計算していく。

また計算には、スタックカートメッシュを使用し、各物理量の配置は、格子中央に水深、水温、塩素量等を置き、格子線上に流速を置く。

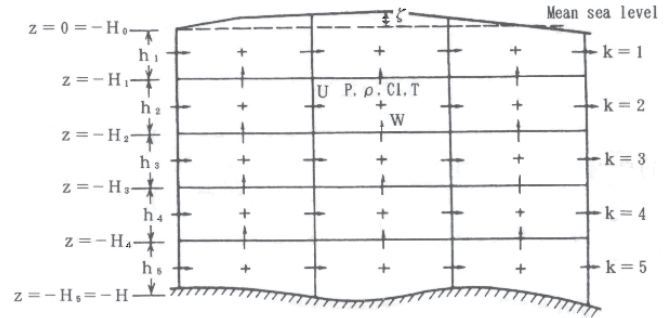


図 5.3 水柱の鉛直層の（レベル）区分

(2) 使用する基礎方程式

a) 連続の方程式

- ・非圧縮性

図 5.4 のように水中の任意の一点 $P(x, y, z)$ における微小六面体 $(\delta x, \delta y, \delta z)$ の流体の質量収支を考える。まず、

x 方向に垂直の面に δt 時間後に入出入りする。まず、 x 方向に垂直の面に δt 時間後に入出入りする質量は

$$\begin{aligned} \text{左面からの流入量} &: \rho u \left(x - \frac{\delta x}{2}, y, z, t \right) \delta y \delta z \delta t \\ &= \rho u(x, y, z, t) \delta y \delta z \delta t - \frac{1}{2} \frac{\partial \rho u}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (5.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{右面からの流出量} &: \rho u \left(x + \frac{\delta x}{2}, y, z, t \right) \delta y \delta z \delta t \\ &= \rho u(x, y, z, t) \delta y \delta z \delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho u}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (5.2) \end{aligned}$$

である。したがって、正味の流入量は

$$-\frac{\partial \rho u}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (5.3)$$

となる。同様に、 y, z 方向の正味の流入量は以下のようにになる。

$$-\frac{\partial \rho v}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (5.4)$$

$$-\frac{\partial \rho w}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (5.5)$$

これらの和が微小直方体内における δt 秒間の変化量

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (5.6)$$

となるので、式 (5.6) = 式(5.3) + 式(5.4) + 式(5.5) としてまとめると以下の関係式が導かれる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (5.7)$$

式(5.7)は質量の保存式である。特に流れが非圧縮であるときには $\frac{D\rho}{Dt} = 0$ は一定であることから、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.8)$$

となる。

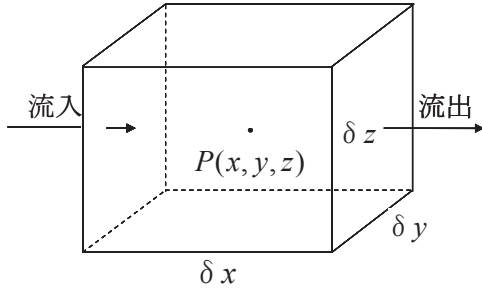


図 5.4 流体の流入出

・乱流場への適用

実際には式(5.8)を乱流場に適用するため、流速を統計的な平均 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ と変動分 u', v', w' とに分け、時間平均をとると

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} + u') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w} + w') = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

となり、変動分の平均が 0 になるので、以下の式に整理できる。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (5.9)$$

これが本研究で用いる連続の方程式となる。

b) 運動方程式

・ナビエーストークス運動方程式

一般的に非圧縮性粘性流体に対するナビエーストークスの運動方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} \frac{Du}{Dt} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dv}{Dt} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dw}{Dt} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (5.10)$$

同式回転している地球上の海水に適用していくことにする。

・コリオリ力について

コリオリ力は回転座標系、たとえば地球のように回転する場所から物体の運動を見た場合に働いているように見える、いわば見かけの力である。この力があるため、北半球では物体の運動が常に右に曲げられる。よって、回転座標系において運動方程式を立てる場合には見かけの力（慣性力）を考慮しなくてはならない。地球上で静止している物体に対しては遠心力のみで足りるが、動いている物体に対してはさらにコリオリ力を考慮する必要があることがわかる。コリオリ力の x, y 成分はそれぞれ次のような形である。

$$\begin{cases} -[2\omega \times V]_x = -2(\omega_y w - \omega_z v) \\ -[2\omega \times V]_y = -2(-\omega_x w + \omega_z u) \end{cases}$$

しかし潮汐波の場合、 ω の項は赤道上以外のところでは ω_z の項に比べて省略できることが証明される。また、座標は図 5.5 に示すように右回りで z 軸が下方を示していることから φ を原点の緯度として北緯を正とすれば

$$\begin{cases} -[2\omega \times V]_x = f v \\ -[2\omega \times V]_y = -f u \end{cases} \quad (5.11)$$

ここに

$$f = 2\omega_z = 2\omega \sin \varphi \quad (5.12)$$

f はコリオリ係数であり緯度の関数とされるが、本研究ではこれが一定であると仮定することにする。したがって、式(5.10)はつぎのようになる。

$$\begin{cases} \frac{Du}{Dt} = f v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dv}{Dt} = -f u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dw}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (5.13)$$

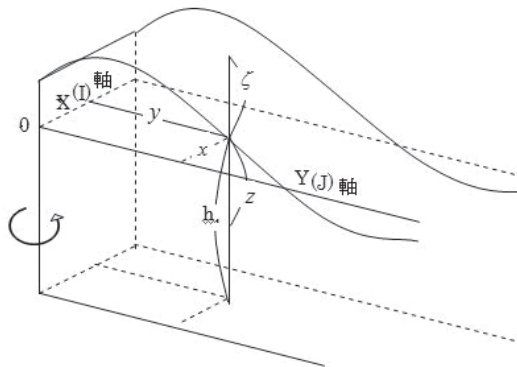


図 5.5 回転座標系

ここに遠心力 g は遠心力が含まれているものであることを追記しておく。

・乱流場への適用

式(5.13)は粘性流体の変形と応用との関係が一次式で表され、しかもその係数 μ がいたる所で一定であるときのみ成立する。このとき μ の分子動粘性係数というが、これは海水が層流状態のときのみあてはまる。そこで乱流場に適用するため連続の式と同様、運動方程式においても流速や圧力を統計的平均値とその変動分との和で $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $w = \bar{w} + w'$, $p = \bar{p} + p'$ のように表し、さらに時間的な平均をとり、式変形する。ここで、式整理に使う条件を以下に示す。

時々刻々の変動の平均であるので 0

$$\overline{F'} = 0 \quad (5.14)$$

平均を平均しても平均であるので

$$\overline{\overline{F}} = \overline{F} \quad (5.15)$$

統計的な平均値 (定数) に変動分をかけた和は 0 である。

$$\overline{\overline{F}G'} = 0 \quad (5.16)$$

平均の積の平均は平均の積のままである。

$$\overline{\overline{F}G} = \overline{FG} \quad (5.17)$$

以上の条件と連続式を援用し、各項ごとに整理すると以下ようになる。

x 方向

・非定常項

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\overline{\bar{u} + u'}) = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}'}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (5.18)$$

・移流項

$$\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\overline{(\bar{u} + u')^2}) = \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + 2 \frac{\partial \overline{\bar{u}u'}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial x} = \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial x} \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial \bar{uv}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} (\overline{(\bar{u} + u')(\bar{v} + v')}) = \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\bar{u}v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\bar{v}u'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} = \frac{\partial \bar{uv}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial \bar{uw}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (\overline{(\bar{u} + u')(\bar{w} + w')}) = \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{\bar{u}w'}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{\bar{w}u'}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} = \frac{\partial \bar{uw}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \quad (5.21)$$

・コリオリ項

$$f\bar{v} = f(\overline{\bar{v} + v'}) = f\bar{v} + f\bar{v}' = f\bar{v} \quad (5.22)$$

・圧力項

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\bar{p} + p'}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}'}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \quad (5.23)$$

・粘性項

$$\mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\bar{u} + u'}) \right\} = \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \quad (5.24)$$

$$\mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} = \mu \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\bar{u} + u'}) \right\} = \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial y^2} = \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \quad (5.25)$$

$$\mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = \mu \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\bar{u} + u'}) \right\} = \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial z^2} = \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (5.26)$$

式(5.18)~(5.26)をまとめると、

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (5.27)$$

となる。y, z 方向も同様に整理し表せば、式(5.13)は次のように書き直される。

$$\begin{cases} \rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = \rho f\bar{v} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\rho f\bar{u} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{D\bar{w}}{Dt} = \rho g - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'^2}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (5.28)$$

ここで、式(5.28)の右辺最終項は移流項から生じたものであり、流れが層流場においてはこれらの項群は 0 となり、Navier-Stokes の運動方程式と一致する。式(5.28)を Reynolds 方程式という。これらの移流項から生じた乱流拡散項は分子拡散項に比べ非常に大きいため、分子拡散項を省略することにより次のように簡略化される。

$$\begin{cases} \rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = \rho f\bar{v} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\rho f\bar{u} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \rho \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{D\bar{w}}{Dt} = \rho g - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \rho \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (5.29)$$

・レイノルズ応力のモデル化

式(5.29)の中に現れるレイノルズ応力は、テンソルの形で次のように表されるものである。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\rho \overline{u'u'} & -\rho \overline{u'v'} & -\rho \overline{u'w'} \\ -\rho \overline{v'u'} & -\rho \overline{v'v'} & -\rho \overline{v'w'} \\ -\rho \overline{w'u'} & -\rho \overline{w'v'} & -\rho \overline{w'w'} \end{pmatrix} \quad (5.30)$$

式(5.29)を解くためには、レイノルズ応力(3.30)を具体的に表す関係式が必要である。レイノルズ応力を分子粘性のように見立て、流れの平均流速分布と関連づけることが従来よりなされてきた方法であるが、本研究においても同様にレイノルズ応力を

$$-\rho \overline{u'v'} = \rho \varepsilon \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (5.31)$$

のように表すこととする。ここでは渦動粘性係数と呼ばれているが、本論ではこれが計算領域で一定と仮定する。さらにを水平方向成分と鉛直方向成分に分けると式(5.29)は次のように表される。

$$\begin{cases} \frac{D\bar{u}}{Dt} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ \frac{D\bar{v}}{Dt} = f\bar{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_v \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ \frac{D\bar{w}}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_v \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \end{cases} \quad (5.32)$$

式(5.32)のz方向の運動方程式において、潮汐流などの長周期波の流れを対象とする場合には、を含む項は、重力項や圧力項に対して無視し、鉛直方向に静水圧平衡を仮定する。

$$\begin{cases} \frac{D\bar{u}}{Dt} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ \frac{D\bar{v}}{Dt} = f\bar{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_v \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ 0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \end{cases} \quad (5.33)$$

よって、式(5.33)が本研究で用いる運動方程式である。

c) 海面および海底の条件

海面を表す式が空間座標(x,y,z)および時刻tにおいて

$$F(x, y, z, t) = 0 \quad (5.34)$$

で表されるとすると、流体粒子が海面から飛び出さないための条件は、微小時間 Δt 後においても

$$F(x + \Delta t, y + \Delta t, z + \Delta t, t + \Delta t) = 0 \quad (5.35)$$

であり、テイラー展開を行い整理すれば、次のように書き換えられる。

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} \quad (5.36)$$

海面は $z = \zeta(x, y, t)$,したがって

$$F = z - \zeta(x, y, t) \quad (5.37)$$

とおくと、式(5.36)に代入して

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} - u \left| \zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \left| \zeta \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \right| \zeta = 0 \quad (5.38)$$

これが海面の条件式である。海底に対しても同様に、

$z = -h(x, y)$ より

$$F = z + h(x, y) \quad (5.39)$$

$$u \Big|_{-h} \frac{\partial h}{\partial x} + v \Big|_{-h} \frac{\partial h}{\partial y} + w \Big|_{-h} = 0 \quad (5.40)$$

d) 熱収支の式

本論で用いる熱収支の式(温度の拡散方程式)は

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + R \quad (5.41)$$

であり、Rは生成項(日射など)である。

e) 塩素量の式

塩素量収支の式も熱収支の式と同様に

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot Cl)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot Cl)}{\partial y} + \frac{\partial(w \cdot Cl)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial Cl}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial Cl}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial Cl}{\partial z} \right) \quad (5.42)$$

f) 密度の式

海水の密度 ρ_s [g/cm³] は

$$\rho_s = \rho(S, T) \quad (5.43)$$

ところで、 Na^+, Cl^- のような海水に含まれる塩類の主要成分イオンが一定の割合で存在するという仮定の下に、塩素量 $Cl_s [\%]$ から塩分 $S [\%]$ を算定する式が提案されている。

$$S = 0.0305 + 1.805Cl_s \quad (5.44)$$

同式はクヌーセンの式と呼ばれているが、これを用いることにより

$$\rho_s = \rho(Cl, T) \quad (5.45)$$

具体的には下に示すような算定方法が提案されている。

$$\begin{cases} \rho_s = 1 + 10^{-3} \sigma_{sT} \\ \sigma_{s0} = -0.069 + 1.4708Cl_s - 0.001570Cl_s^2 + 0.0000389Cl_s^3 \\ \sigma_{sT} = -\frac{(T-3.98)^2}{503.570} \cdot \frac{T+283.0}{T+67.26} + (\sigma_{s0} + 0.1344)(1 - A_i + B_i(\sigma_{s0} - 0.1324)) \end{cases} \quad (5.46)$$

ここに

$$\begin{cases} A_i = T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \times 10^{-3} \\ B_i = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6} \end{cases} \quad (5.47)$$

式(5.47)より、海水の密度 ρ_s が塩素量 Cl_s と水温 T を与えることによって計算できる。

g) 境界条件

境界条件の取り扱い、湾内に潮汐が入ってくる場合のみを考えている。自由表面 ζ には、進出する潮汐波の波動を与え、流速成分 u_k, v_k, w_k については、外部との運動量交換が自由に行なわれるという、自由流出条件 (free-stream condition) を与える。

$$\zeta = \zeta_0 + \sum_i A_i \cdot \cos(\omega_i t - k_i) \quad (5.48)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial n} = \frac{\partial v_k}{\partial n} = \frac{\partial w_k}{\partial n} = 0 \quad (k=1,2,3,\dots,K) \quad (5.49)$$

温度 T_k と塩素量 Sa_k に対しては、上流側境界の T, Sa_k を固定し、下流側境界では自由流出の取り扱いをすると流出境界で

$$k \frac{\partial T_k}{\partial n} = k \frac{\partial Sa_k}{\partial n} = 0 \quad (5.50)$$

流入境界では

$$T_k = T_k^0, Sa_k = Sa_p^0 \quad (k=1,2,3,\dots,K) \quad (5.51)$$

壁面および陸岸の境界条件の取り扱いは、海水の流入出はないものと考え、境界を横切る流量を 0 とした。

$$M = 0, \quad N = 0 \quad (5.52)$$

ここに、

M, N : それぞれ x,y 方向の線流量成分
n : 開境界法線方向

自由表面上の粘性応力は、Bulk 公式による風応力の定式化を行う。

$$\frac{1}{\rho} \tau_x^s = \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \gamma_s^2 \cdot W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5.53)$$

$$\frac{1}{\rho} \tau_y^s = \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \gamma_s^2 \cdot W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

ここに、

W_x, W_y : 風速ベクトルの x,y 方向成分

τ_x^s, τ_y^s : 風応力の x,y 方向成分

ρ_a : 空気密度

γ_s^2 : 海面摩擦係数

海面上においては、Bulk 公式を使って海面摩擦応力を定式化した。

$$\frac{1}{\rho} \tau_b^{x,y} = \gamma_b^2 \cdot (u_k, v_k) \sqrt{u_x^2 + v_y^2} \quad (5.54)$$

内部境界面の挙動は、中立な成層を基本として検討されているが、中立での評価方法は、Richardson 数の関数として表現され、不安定な場合は、Mamayev 等の理論がある。本論では、以下に示す式を用いて計算した。

$$\frac{1}{\rho} \tau^{k-1,k} = -\gamma_i^2 \cdot |v_{k-1} - v_k| (v_{k-1} - v_k) \quad (5.55)$$

以上のように、本論における基礎理論を示した。

5.4 基礎方程式の断面内積分

基礎方程式を各層において水深方向に平均化 (断面内積分) することにより二次元化を行う。その際、積分記号下の微分に関する公式として、

$$\frac{d}{dy} \int_{x_1}^{x_2} f(x,y) dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} dx + f(x_2,y) \frac{dx_2}{dy} - f(x_1,y) \frac{dx_1}{dy} \quad (5.56)$$

を用いる。また各層の区分については便宜上次のように区分する。

第一層 (表層) : 海面 $z = \zeta$ から $z = -H_1$ まで

第 k 層 : $z = -H_{k-1}$ から $z = -H_k$ まで

第 LN 層 (底層) : $z = -H_{LN-1}$ から $z = -H_{LN}$ まで

また表記上簡略のため

$$\int_{-H_k}^{-H_{k-1}} \rightarrow \int_{h_k}, \quad \int_{h_k} u dz \rightarrow M_k, \quad \int_{h_k} v dz \rightarrow N_k$$

と記述することにする.

(1)連続の方程式

第一層 (表層)

$$\int_{h_1} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) dz = 0$$

公式(5.56)を用いて

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{h_1} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_1} v dz + \frac{\partial}{\partial z} \int_{h_1} w dz - u \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \Big|_{\zeta} - w \Big|_{-H} = 0 \quad (5.57)$$

ここで海面の条件式(5.38)を代入することにより

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = w \Big|_{-H_1} - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y} \quad (5.58)$$

第 k 層

表層の場合と同様にして

$$\frac{\partial M_k}{\partial x} + \frac{\partial N_k}{\partial y} + w \Big|_{-H_{k-1}} - w \Big|_{-H_k} = 0 \quad (5.59)$$

第 LN 層 (底層)

$$\frac{\partial M_{LN}}{\partial x} + \frac{\partial N_{LN}}{\partial y} + w \Big|_{-H_{LN-1}} - w \Big|_{-H_{LN}} = 0$$

$$w \Big|_{-H_{LN}} = 0 \text{ より}$$

$$\frac{\partial M_{LN}}{\partial x} + \frac{\partial N_{LN}}{\partial y} + w \Big|_{-H_{LN-1}} = 0 \quad (5.60)$$

式(5.58), (5.59), (5.60)より漸化的に

$$\begin{cases} w_k = 0 & (k = LN) \\ \frac{\partial M_k}{\partial x} + \frac{\partial N_k}{\partial y} + w \Big|_{-H_{k-1}} - w \Big|_{-H_k} = 0 & (k = 2, 3, \dots, LN) \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} = w \Big|_{-H_1} - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y} & (k = 1) \end{cases} \quad (5.61)$$

(2)運動方程式

x 方向の運動方程式

$$\frac{D\bar{u}}{Dt} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (5.62)$$

について考えていく. 積分操作を行うに先立って, 同式を少し変形しておく.

連続の方程式, 式(5.9)を考慮することにより,

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (5.63)$$

と変形できる. 式(5.64)を各層において積分することにする.

・非定常項, 移流項

非定常項, 移流項に関しては, 公式(5.56)より

$$\begin{aligned} \int_{h_k} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right\} dz &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{h_k} \bar{u} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_k} \bar{u}^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_k} (\bar{u}\bar{v}) dz \\ &\quad - \bar{u} \Big|_{-H_{k-1}} \frac{\partial(-H_{k-1})}{\partial t} + \bar{u} \Big|_{-H_k} \frac{\partial(-H_k)}{\partial t} \\ &\quad - \bar{u}^2 \Big|_{-H_{k-1}} \frac{\partial(-H_{k-1})}{\partial x} + \bar{u}^2 \Big|_{-H_k} \frac{\partial(-H_k)}{\partial x} \\ &\quad - \bar{u}\bar{v} \Big|_{-H_{k-1}} \frac{\partial(-H_{k-1})}{\partial y} + \bar{u}\bar{v} \Big|_{-H_k} \frac{\partial(-H_k)}{\partial y} \\ &\quad + (\bar{u}\bar{w}) \Big|_{-H_{k-1}} - (\bar{u}\bar{w}) \Big|_{-H_k} \end{aligned} \quad (5.64)$$

第一層 (表層)

海面の条件式 (5.38) を用いると, 式 (5.64) は

$$\int_{h_1} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right\} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{h_1} \bar{u} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_1} \bar{u}^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_1} (\bar{u}\bar{v}) dz - (\bar{u}\bar{w}) \Big|_{-H_1} \quad (5.65)$$

第 k 層

$$\begin{aligned} \int_{h_k} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right\} dz &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{h_k} \bar{u} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_k} \bar{u}^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_k} (\bar{u}\bar{v}) dz \\ &\quad + (\bar{u}\bar{w}) \Big|_{-H_{k-1}} - (\bar{u}\bar{w}) \Big|_{-H_k} \end{aligned} \quad (k = 2, 3, \dots, LN-1) \quad (5.66)$$

第 LN 層 (底層)

海底の条件式, 式 (5.40) より

$$\int_{h_{LN}} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial z} \right\} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{h_{LN}} \bar{u} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_{LN}} \bar{u}^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_{LN}} (\bar{u}\bar{v}) dz + (\bar{u}\bar{w}) \Big|_{-H_{LN-1}} \quad (5.67)$$

・コリオリ項

コリオリ項については

$$\int_{h_k} f_0 V dz = f_0 \left(\int_{h_k} V dz \right) \quad (5.68)$$

・圧力項

z 方向の運動方程式は

$$-g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = 0$$

z = \zeta で P = P_a とすれば,

$$P = P_a + g \int_z^\zeta \rho dz \quad (5.69)$$

各層内で密度が一定であると仮定すれば, 第 k 層における圧力 P_k は

$$\begin{aligned} P_k &= P_a + g \int_{-H}^\zeta \rho_1 dz + \sum_{i=2}^{k-1} \left\{ g \int_{h_i} \rho_i dz \right\} + g \int_z^{-H_{k-1}} \rho_k dz \\ &= P_a + \rho_1 g (\zeta + H_1) + \sum_{i=2}^{k-1} \rho_i g (H_i - H_{i-1}) - \rho_k g (z + H_{k-1}) \\ &= P_a + \rho_1 g h_1 + g \sum_{i=2}^{k-1} \rho_i h_i - g (z + H_{k-1}) \rho_k \quad (5.70) \end{aligned}$$

したがって

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_0}{\partial x} + \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \sum_{i=2}^{k-1} h_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} - g (z + H_{k-1}) \frac{\partial \rho_k}{\partial x}$$

1/\rho k を掛け, 積分すると

$$\int_{h_k} \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{h_k}{\rho_k} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\rho_1 g h_k}{\rho_k} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g}{\rho_k} \sum_{i=2}^{k-1} h_i h_k \frac{\partial \rho_i}{\partial x} - \frac{g}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \int_{-H_k}^{-H_{k-1}} (z + H_{k-1}) dz \quad (5.71)$$

さらには

$$\int_{h_k} \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{h_k}{\rho_k} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\rho_1 g h_k}{\rho_k} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g}{\rho_k} \sum_{i=2}^{k-1} h_i h_k \frac{\partial \rho_i}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{g}{\rho_k} h_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial x}$$

同式の煩雑さゆえ

$$[P_x]_k = - \int_{h_k} \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P}{\partial x}$$

と置くと,

$$\begin{cases} \frac{\rho_1}{h_1} [P_x]_1 = - \frac{\partial P_0}{\partial x} - \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{2} g h_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} & (k=1) \\ \frac{\rho_k}{h_k} [P_x]_k - \frac{\rho_{k-1}}{h_{k-1}} [P_x]_{k-1} \\ = -g h_{k-1} \frac{\partial \rho_{k-1}}{\partial x} - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} + \frac{1}{2} g h_{k-1} \frac{\partial \rho_{k-1}}{\partial x} & (k \geq 2) \end{cases} \quad (5.72)$$

$$[\tilde{P}_x]_k = \frac{\rho_k}{h_k} [P_x]_k + \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \quad (5.73)$$

と置くと

$$\begin{cases} [\tilde{P}_x]_1 = - \frac{\partial P_0}{\partial x} - \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} & (k=1) \\ [\tilde{P}_x]_k = [\tilde{P}_x]_{k-1} - g h_{k-1} \frac{\partial \rho_{k-1}}{\partial x} & (k \geq 2) \end{cases} \quad (5.74)$$

(5.74) から $[\tilde{P}_x]_k$ が求まれば,

$$[P_x]_k = \frac{h_k}{\rho_k} \left\{ [\tilde{P}_x]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} \quad (5.75)$$

同式より $[\tilde{P}_x]_k$ が求まることになる.

・水平渦粘性項

次に水平渦動粘性係数項に関しては,

$$\int_{h_k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right\} dz \sim \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_k} v_h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_k} v_h \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} dz \quad (5.76)$$

同式は表層・底層では近似式になっているが, それ以外では等号が成り立つ.

・鉛直渦粘性項

鉛直渦動粘性係数項については

$$\int_{h_k} \frac{\partial}{\partial z} \left(N_2 \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \tau_x^s - \frac{1}{\rho} \tau_x^{1,2} & (k=1) \\ \frac{1}{\rho} \tau_x^{k-1,k} - \frac{1}{\rho} \tau_x^{k,k+1} & (k=2,3,\dots,k-1) \\ \frac{1}{\rho} \tau_x^{K-1} - \frac{1}{\rho} \tau_x^b & (k=K) \end{cases} \quad (5.77)$$

ここに

τ^s : 風応力

$\tau^{k-1,k}$: k-1 から k 層の間の摩擦内部応力

τ^b : 海底摩擦応力

したがって式 (5.72) を k 層について積分した形は

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(M_k \bar{u}_k) - \frac{\partial}{\partial y}(M_k \bar{v}_k) + (\bar{u}\bar{w}) - H_{k-1} - (\bar{u}\bar{w}) - H_k \\
& + f_0 N_k + \frac{h_k}{\rho_k} \left\{ [\tilde{P}_x]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial M_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial M_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_x^{k-1,k} - \frac{1}{\rho} \tau_x^{k,k+1}
\end{aligned} \tag{5.78}$$

y 方向の運動方程式についても同様に

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(N_k \bar{u}_k) - \frac{\partial}{\partial y}(N_k \bar{v}_k) + (\bar{v}\bar{w}) - H_{k-1} - (\bar{v}\bar{w}) - H_k \\
& + f_0 M_k + \frac{h_k}{\rho_k} \left\{ [\tilde{P}_y]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \right\} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial N_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial N_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_y^{k-1,k} - \frac{1}{\rho} \tau_y^{k,k+1}
\end{aligned} \tag{5.79}$$

5.5 粒子追跡モデル

現地実験における流れの状況を検討するため、粒子追跡モデルを適用して数値計算によって流れ場における粒子の動きを追跡した。

(1) 粒子追跡モデルの基礎理論

粒子輸送の基礎方程式は、以下の微分方程式の初期値問題を2段階のRunge-Kutta法で解くモデルとなっている。

a) Runge-Kutta 法

一般に2段階のRunge-Kutta法は

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \Delta t f(x_n, t_n) \\ k_2 &= \Delta t f(x_n + k_1, t_n + \Delta t) \end{aligned} \right\} \tag{5.80}$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \tag{5.81}$$

$$x_{n+1} = x_n + \Delta x \tag{5.82}$$

の形で用いることができる。

b) 多変数の Runge-Kutta 法

上記のRunge-Kutta法は、1変数のRunge-Kutta法であったが、本論では多変数で取り扱わなければならないので、多変数のRunge-Kutta法を以下に示す。

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \tag{5.83}$$

$$x(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \dots \\ x_t(t) \end{Bmatrix} \tag{5.84}$$

$$f(x) = \begin{Bmatrix} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_3(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{Bmatrix} \tag{5.85}$$

ここでは、 x は3次元位置ベクトル、 $f(x)$ は粒子位置での流速ベクトル、 Δt は計算時間間隔である。さらに、以下の初期条件を加えることで多変数における2段階Runge-Kutta法を得る。

初期条件

$$t(0) = t_0, \quad x(0) = \begin{Bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \\ \dots \\ x_t(0) \end{Bmatrix} \tag{5.86}$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \Delta t f(x) \\ k_2 &= \Delta t f(x + k_1) \end{aligned} \right\} \tag{5.87}$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \tag{5.88}$$

$$x(t + \Delta t) = x_n(t) + \Delta x \tag{5.89}$$

(2) 粒子追跡モデル

本研究で用いる式

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= u + \Delta t \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{dy}{dt} &= v + \Delta t \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{dz}{dt} &= w \end{aligned} \right\} \tag{5.90}$$

初期条件

$$X(0) = X_0 \tag{5.91}$$

$$Y(0) = Y_0 \tag{5.92}$$

$$Z(0) = Z_0 \tag{5.93}$$

以上を2段階のRunge-Kutta法で粒子の位置を予測していく. ここにおける u, v, ω はスタaggerドグリッドのベクトル量が定義される場所の値ではなく, 粒子の存在する場所での補間された流速である.

a) 流速の補間について

粒子位置での流速は粒子近くの流速を用いて内挿する. しかし, 同じメッシュ内にある粒子でも位置によって補間に用いられる流速が違ふ. 例えば, メッシュ内のY方向の位置 DY が水平格子幅 $DS * 0.5$ より大きい場合, 粒子位置での u 流速は図 5.6 のように, 粒子の存在するメッシュの流速である UC, UE とそれより北の流速 UN, UNE で補間される. それに対して DY が水平格子幅 $DS * 0.5$ より小さい場合は図 5.7 のように, UC, UE とそれより南の流速 US, USE で補間される. また, 粒子のZ方向の位置でも u の補間値が変わるため, 粒子の位置で u, v, ω それぞれ4種類の補間値がある.

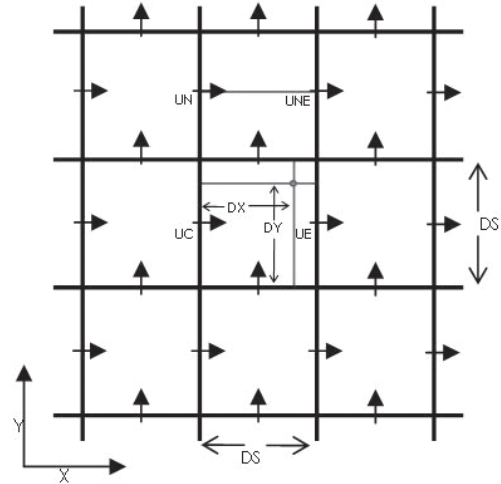


図 5.6 粒子位置での流速その1

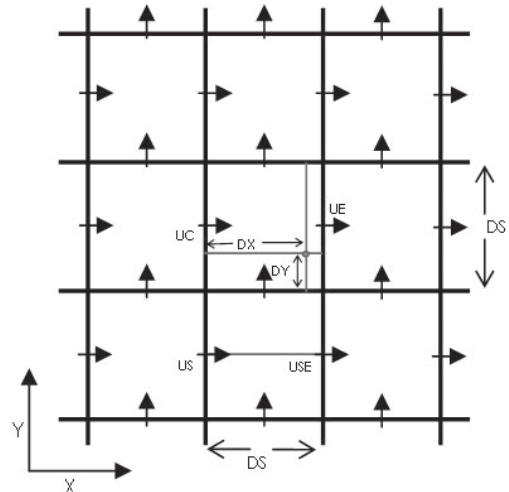


図 5.7 粒子位置での流速その2

b) 境界における取り扱い

・slip 条件

粒子の存在するメッシュに隣接するメッシュが壁であるとき, 粒子位置での流速の補間に壁内部の値を使う. そのとき壁内部の値は, 壁外部から外挿するのが適切であるが, 壁の内部に埋め込まれる値は, 壁上における境界条件を満たしておかなければならない. 本研究では, 壁上で slip 条件を与えているので, 壁内部の流速は以下の式(5.94)から求められる.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y} = 0, & \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = 0, & \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial w}{\partial x} = 0, & \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \end{aligned} \right\} \tag{5.94}$$

・粒子の反射

図 5.8 のように壁付近の粒子が次ステップで壁の中に入り込んでしまう場合, 入り込む距離 L の分だけ壁と垂直方向に反射させる (図 5.9).

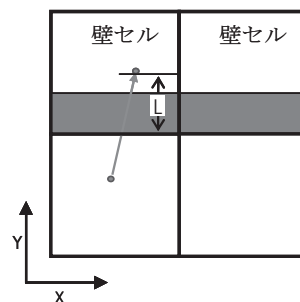


図 5.8 粒子の反射その1

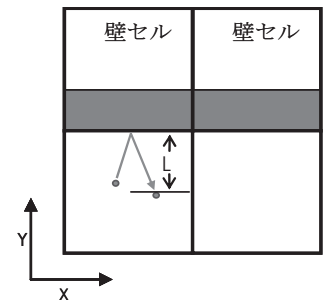


図 5.9 粒子の反射その2

c) 粒子追跡モデル計算フロー

図 5.10 に粒子追跡モデルの計算フローを示した. また, 以下に概略の計算手順を記述しておく.

1. 計算条件の設定

境界内部の流速を *SLIP* 条件で与えるか, *NO-SLIP* で与えるかを決定する. また, 粒子が壁にぶつかったときの反射係数の設定等を行う.

2. 初期粒子位置 $PCLX(0)$ の決定

前の粒子計算ステップで求められた粒子位置を現計算ステップにおける初期粒子位置 $PCLX(0)$ とする.

3. Runge-Kutta の段階ステップ (2 段階)

4. 粒子位置 $PCLX(L-1)$ での流速等を決定
- 1段階目においては、初期粒子位置 $PCLX(0)$ での流速やせん断力等を求めることになる。
 - 2段階目では、1段階目に推定された粒子位置 $PCLX(1)$ での流速などを求める。
5. 粒子の移動距離 $SPCLXS(L)$ を計算
式 (5.89) に計算時間間隔を乗することで、粒子移動距離を計算する。
6. 粒子位置の推定
- 1段階目では、 $SPCLX(L)=PCLX(0)+SPCLXS(L)$ の式から粒子位置を推定する。
 - 2段階目では、 $SPCLX(L)=PCLX(0)+0.5 \times$
- ($SPCLXS(L-1)+SPCLXS(L)$)から粒子位置を推定する。
7. 粒子の移動距離が水平格子間隔の2倍を超えるかどうかの判断
もし超えることがあると、粒子位置の推定が精度よくできないとして計算時間間隔の短縮を促す文章を出力し、計算を途中で打ち切る。
8. 境界条件を考慮した新たな粒子位置の推定
- 1段階目では、推定された粒子位置を用いて2段階目の流速を求めていく。
 - 2段階目では、計算された粒子位置が次ステップの粒子位置となる。

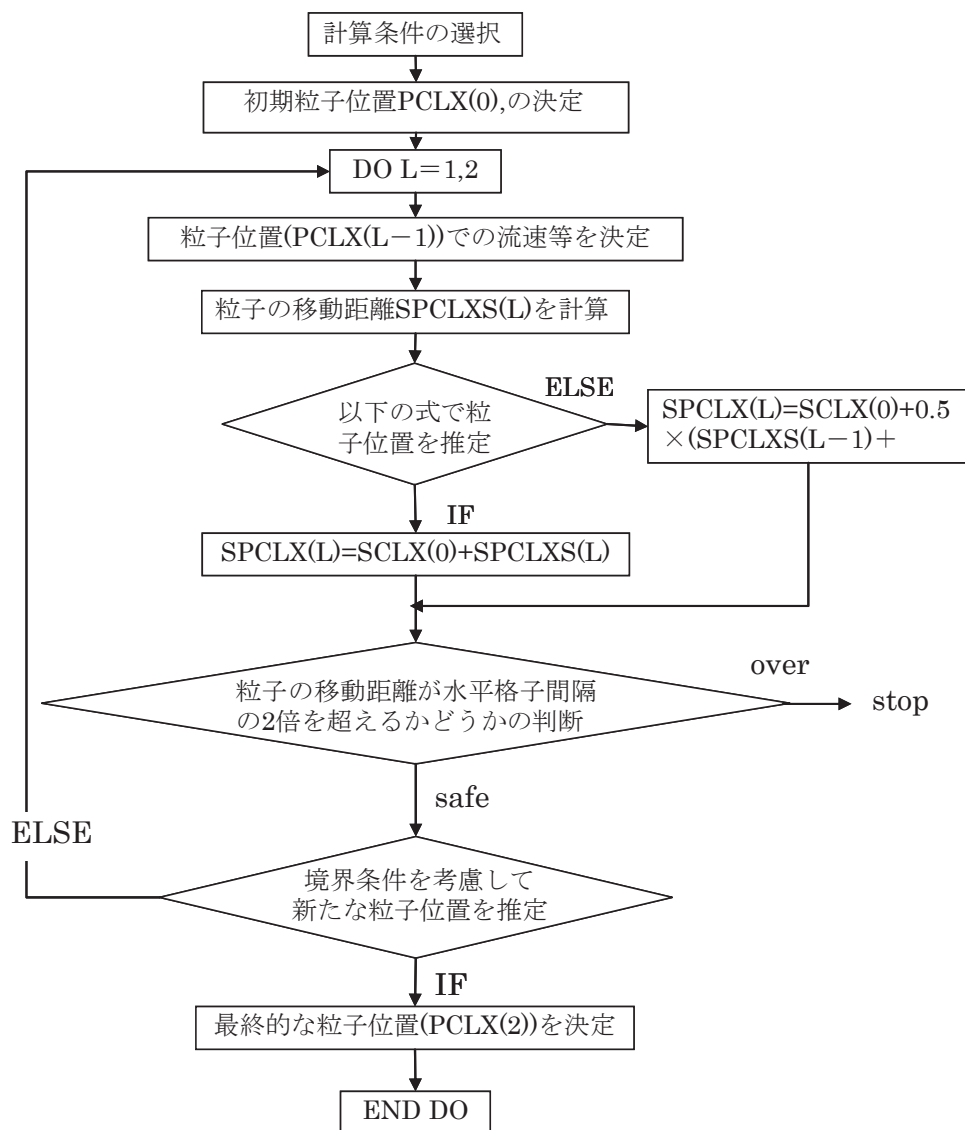


図 5.10 粒子追跡モデル計算フロー

5.6 数値シミュレーションモデルによる潮流計算, 粒子追跡計算

ここでは, 3~5項で示した流体力学基礎理論, 粒子追跡基礎理論を基に構築された数値シミュレーションモデルを用いた潮流計算, 粒子追跡計算を行う。

(1) 計算領域

計算領域は, 図 5.11 に示した南北 700 m, 東西 500 m の範囲とする。これを水平方向に 10 m 間隔で区切っていき, $70 \times 50 = 3,500$ メッシュ, 鉛直方向に 4 層に分け計算を行う。最大水深は, 津田港平面図を基に -8 m とする。開境界は図中の赤線で示した 4ヶ所 (A,B,C,D) に設定する。図 5.12, 図 5.13 に対象海域の海底地形図を示す。

特に本研究では, 離岸堤周辺の流動場を精度よく再現することを目的としており, 無風条件下で駆動力は潮流のみとして計算を行っている。

(2) 計算の諸条件の設定

多層モデルにおいては, 鉛直渦動粘性の効果は最上層 (第 1 層) の海面上で風による吹き寄せ効果として作用し, 最下層 (第 K 層) の海底面上で海底摩擦による流れへの抵抗力として作用する。また, 中間層 (第 2 層~第 K 層) の海底面上では各層間での摩擦力として作用する。一般的には次の値が用いられている。

a) 海面摩擦係数

風によるせん断応力はバルク公式を用いて定式化を行う。

$$\tau_x^2 = \rho_a \gamma_s^2 w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2}$$

$$\tau_y^2 = \rho_a \gamma_s^2 w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2}$$

ここに, τ_x^2, τ_y^2 : 風応力の x, y 方向成分

γ_s^2 : 海面摩擦係数 (0.0013~0.0016)

w_x, w_y : 海上風の x, y 方向成分

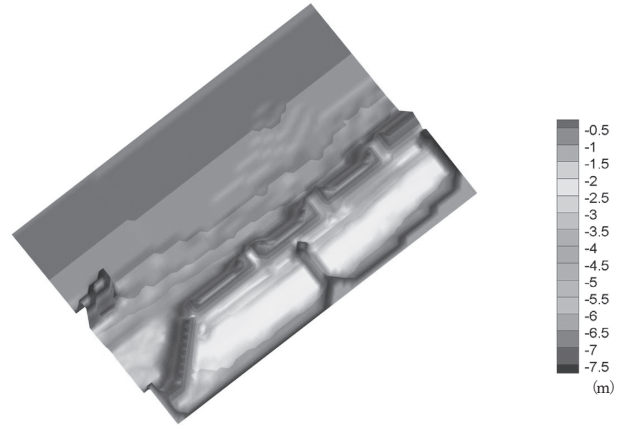


図 5.12 対象海域の海底地形図 1

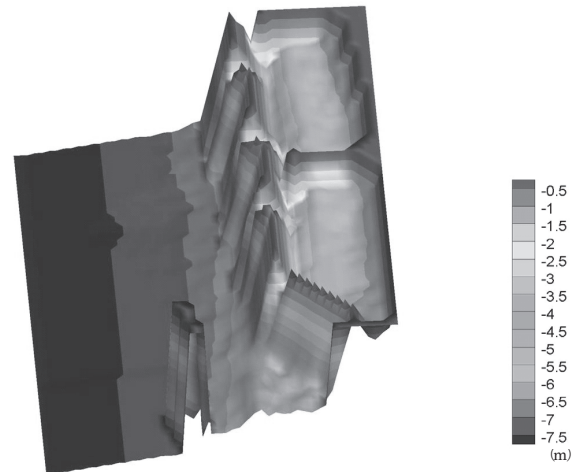


図 5.13 対象海域の海底地形図 2

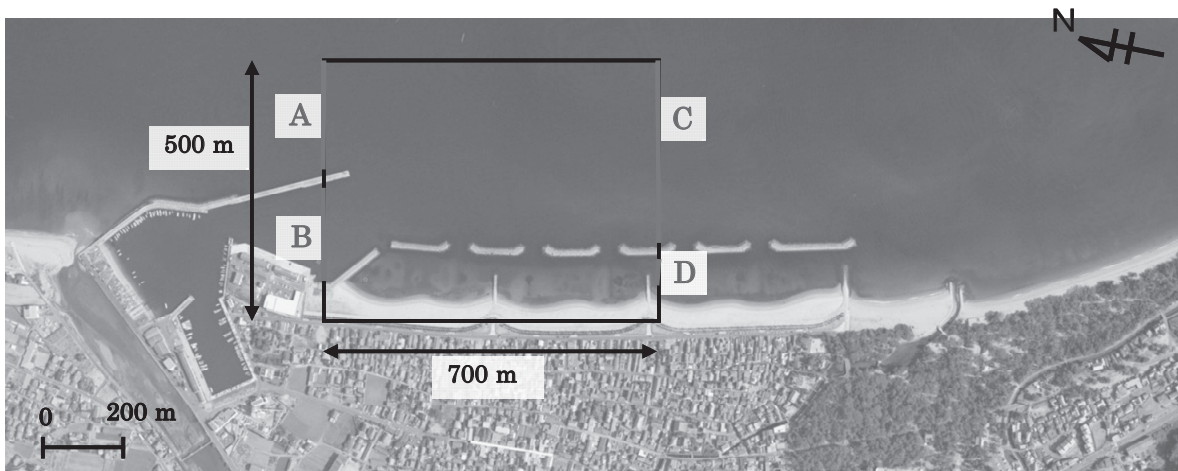


図 5.11 計算領域

b) 境界面摩擦係数

海底摩擦係数の約 1/10~3/4 程度のオーダーが用いられることが多い。

$$r_1^2 = 0.0001 \quad (\text{堀江：密度分布を考慮せず})$$

$$r_1^2 = 0.001 \sim 0.002 \quad (\text{中田喜三郎：密度分布あり})$$

c) 海底摩擦係数

予想対象範囲内に一律に $\gamma_b^2 = 0.0026$ とする場合が多いが、シェジの粗度係数 C を用いて水深 h の関数として扱うこともある。

$$\text{この場合, } C = h^{1/6} / n$$

n : マニングの粗度係数(=0.026)

h : 水深

となり, $\gamma_b^2 = g/C^2$ となる。

d) 水平渦動粘性係数の設定

水平渦動粘性係数は流体の運動状態（流れの大きさ、パターン等）や運動規模（シミュレーションの場合の格子間隔）によってその大きさは変化する。格子間隔が数 km オーダーの予測計算においては格子自体のもつ平均化作用の方が水平渦動粘性の効果は予測結果に重要な影響を与えるようになる。

水平渦動粘性係数の値は、黒潮海流の場合で $10^6 \sim 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度といわれているが確定したものでなく、一般的には、水平拡散係数と同程度の値を用いることが多い。

e) 水平拡散係数の設定

1960 年以降、拡散係数は海面に染料などを投入し、その広がりや時々刻々と実測することで求めることが多かった。

一般的に、染料の拡散幅 $\sqrt{Y^2_r}$ は時間とともに増大していくので拡散係数 K は時間の関数であり、以下の式で表される。

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\sqrt{Y^2_r}}{dt} \quad (5.95)$$

ここで、 $\overline{Y^2_r}$ は分散を表す。染料を投入してから、染料の可視領域が最大となるときまでは分散は時間の 3 乗に比例することがわかっているため、式(5.95)は拡散係数が拡散幅の 4/3 乗に比例していることを示すことになる。これはリチャードソンの 4/3 乗則としてよく知られている。この段階の拡散係数は航空写真などを用い、可視領

域を時間的に測ることで拡散係数を求めることができる。図 5.14 は上述の方法で実測された拡散幅と拡散係数との関係であり、リチャードソンの 4/3 乗則は実測と良好な一致を示すことがわかる。つまり拡散係数は拡散幅と拡散時間との関数であることがわかる。当然精度よく拡散方程式を解くには、拡散係数がこの関係を考慮したものでなければならない。しかし、対象海域における拡散係数の大綱を知るために、その海域の水平スケールを拡散幅として図から拡散係数を求め、海域において一定にすることが多い。

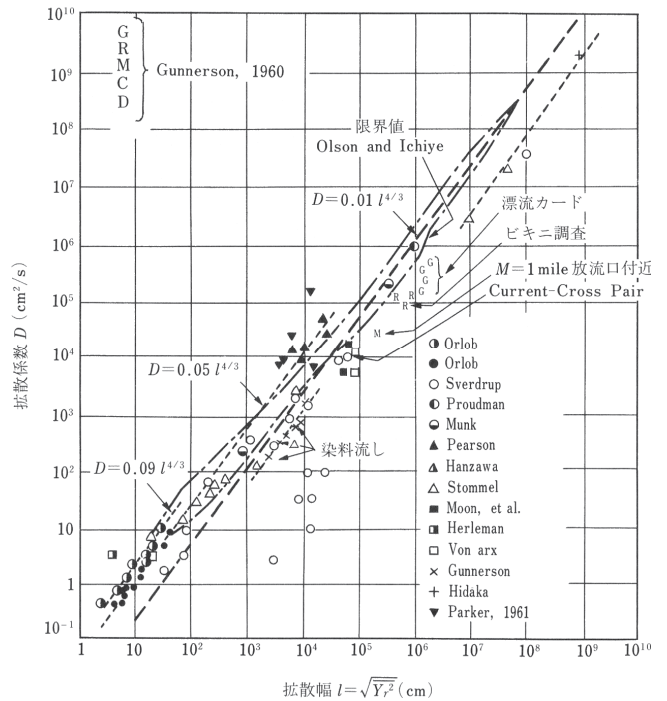


図 5.14 水平乱流拡散係数

f) 鉛直拡散係数の設定

一般的に $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度とされている。また、躍層がある場合など、密度鉛直勾配が大きい場合には $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の小さい値となる。

(3) 計算条件

諸条件を設定し、表 5.1 に示す計算条件で数値計算を行う。

5.7 潮流計算結果

図 5.15, 図 5.16 に対象海域の 1 潮汐周期における第 3 層の潮流計算結果の流況図を示した。数値計算時の潮位振幅は、対象海域の潮位に近い 0.3 m として計算を行った。これらの流況図から、上げ潮最強時、下げ潮最強時のいずれも第 4 章の実測値と近い値になっており、計算結果と観測結果は良い一致を示しているため、このことから数値計算における潮流流は精度よく再現できている。

表 5.1 計算条件

| 緒元 | 1層 | 2層 | 3層 | 4層 |
|--------------------------------|----------------------|---------|---------|--------------|
| 格子間隔(m) | 10.0 | | | |
| 時間間隔(sec) | 0.1 | | | |
| 層厚(m) | 0~0.5 | 0.5~1.5 | 1.5~4.0 | 4.0~最深部(8.0) |
| 境界面摩擦係数 | 1.3×10^{-3} | | | |
| 海底摩擦係数 | 2.6×10^{-3} | | | |
| 海面摩擦係数 | 1.3×10^{-3} | | | |
| 水平渦動粘性係数(m ² /sec) | 0.1 | | | |
| 水温初期値(°C) | 19.2 | 19.1 | 19.1 | 19.1 |
| 水温水平拡散係数(m ² /sec) | 10.0 | | | |
| 水温鉛直拡散係数(m ² /sec) | 1.0×10^{-5} | | | |
| 塩素量初期値(PPT) | 18.6 | 18.7 | 18.7 | 18.7 |
| 塩素量水平拡散係数(m ² /sec) | 10.0 | | | |
| 塩素量鉛直拡散係数(m ² /sec) | 1.0×10^{-5} | | | |
| 開境界 | A,B,C,D (4ヶ所) | | | |
| 潮位振幅(m) | 0.3 | | | |
| 潮汐周期(時間) | 12.4 | | | |
| 緯度(° N) | 34.3 | | | |
| コリオリパラメータ(rad/sec) | 8.2×10^{-5} | | | |

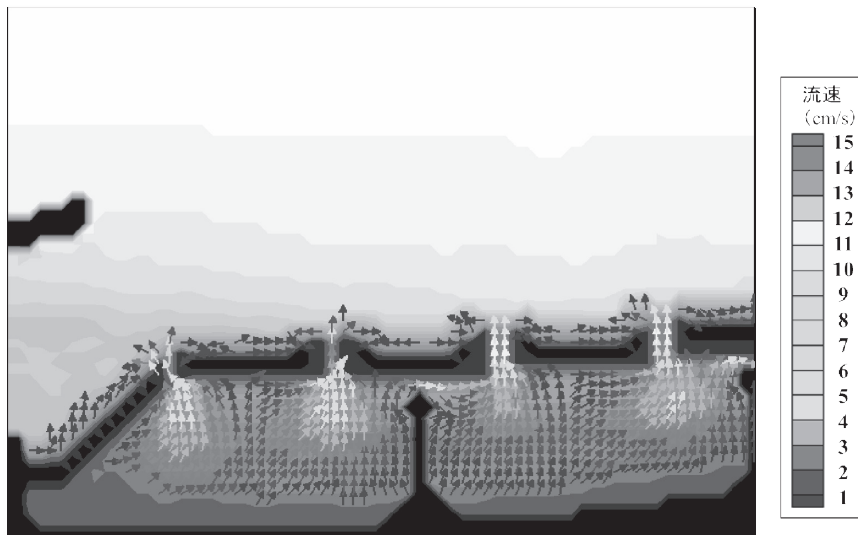


図 5.15 下げ潮最強時の流況 (cm/s)

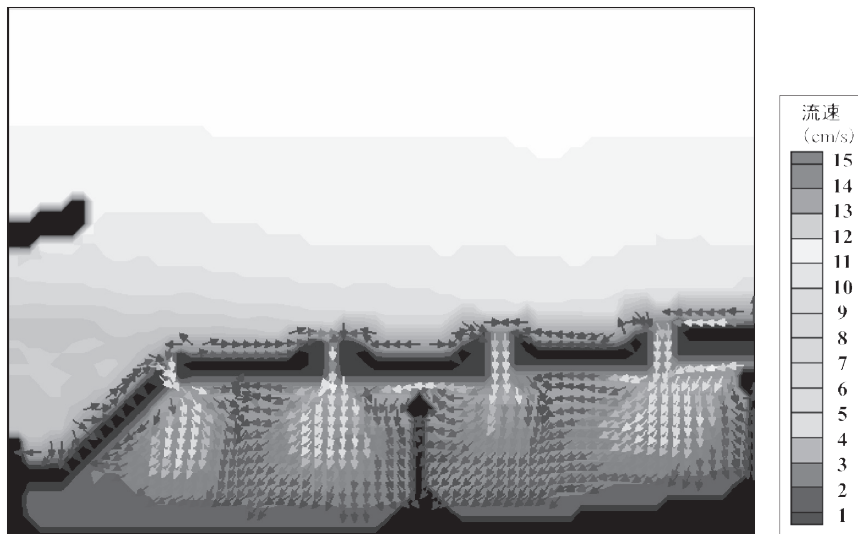


図 5.16 上げ潮最強時の流況 (cm/s)

ものと判断した。流況図をみると、離岸堤開口部の流速が速いところで10cm/s以上あり、通常状態であればアマモにとって生育適地であるが、台風等のイベント発生時には大きな波浪の影響を受けるため、この付近は継続的なアマモの生育場としてあまり適していないことが予想される。また、逆に離岸堤背後域の中央部付近では、実測値と同様に流速が非常にゆるやかな計算結果となった。

アマモ種子の流速による底質への定着条件については、中瀬ら⁴⁾が、千葉県竹岡海岸の波高1m、周期4秒の条件におけるアマモの分布範囲の推定条件として、水深-5.5m以浅、流速8.0cm/s以下、地形変化量-0.5~4.0cm/日を示している。このことを踏まえると、平常時では本研究の離岸堤背後域の流速環境は、ほぼアマモ生育適地とみなすことができる。しかし、台風等の波浪の影響を直接受けた場合には、特に離岸堤開口部に波浪のエネルギーが集約され、砂面の移動による地形変化量も大きいことから、生育に不適な環境になってしまうことが予想できる。実際に1999年3月に移植したアマモ試験区Dでは、台風0310号(8月上旬)によって試験枠ごと消失した¹⁾。

アマモの分布規模は、離岸堤背後域中央部への他生物や浮泥の堆積による減耗と離岸堤開口部付近の状況により変化すると推定される。2004年度以降は四国地方に大型の台風が接近していないこともあり、現在では徐々に拡大傾向にはあるが、地球温暖化の影響で大型化している台風の規模・進路によっては、直接的な波浪の影響が大きくなり、アマモ場が減耗・消失することも考えられた。

5.8 粒子追跡計算結果

数値計算では、アマモ種子を粒子に見立て、実際の生育エリアに粒子を投入することでアマモ種子の追跡計算を行った。アマモ種子の移送形態は、花枝から直接脱落してしまう種子、寄り藻となって海底をゆるやかに移送され滞留する種子、流れ藻となって表層付近を移送される種子の3つのパターンが考えられる。したがって、本研究ではアマモ場が分布しているエリア全体に均等に粒子を配置し、流れ藻を想定した表層(水面下-0.1m)、実際の花穂の位置を想定した中層(水面下-1.6m)、底層(水面下-2.0m)の3層に粒子を投入した。1層当たりの粒子数を512個とし、総粒子数を1,536個(512個×3層)とした。計算時間は、離岸堤周辺において潮汐流によるアマモ種子の移送状況が把握できるまでとして、様々なパターンを検討した結果、2週間程度で粒子の移送状況が把握できたため、1潮分(2週間)を計算時間として設定した。

図5.17に粒子の移送状況について、2日(48時間)毎

の結果を示した。ここでは3層に配置した粒子の移送状況が分かりやすいよう3色に色分けして示した。

アマモ種子に見立てた粒子は、2日後には離岸堤Aの主に北側の開口部から沖合方向へ移送された。その後粒子は離岸堤前面域では南向きの流れに乗って離岸堤Bに沿って移送され、4日後には潮流の影響により南側から離岸堤背後域に押しもどされる粒子がみられた。粒子の移送状況から、離岸堤前面に位置する突堤Eの影響により主に南向きの流れが形成されることが確認できた。この間離岸堤背後域に残った粒子はゆっくりと拡散していった。

離岸堤背後域にある粒子については、6~10日後までの間では、背後域中央部付近でゆっくりとした時計回りの渦を形成して、その場に滞留しながら徐々に拡散していった。8日後を過ぎると離岸堤背後域に形成されたゆっくりとした循環流により浅い方では波打ち際まで拡散し、一部の粒子は離岸堤開口部や離岸堤Cと突堤Fの開口部へ押し出されていった。

離岸堤前面に流された粒子はゆっくりと南方向に運ばれ、12日後には離岸堤CとDの開口部から隣の離岸堤背後域に移送されるものもみられた。

これらの結果から、潮流による離岸堤背後域への粒子の供給(移送)を確認することができた。12日以降からは、一連の粒子移送工程が継続して行われており、14日以降も同様な粒子移送が繰り返されるものと考えられる。したがって、この離岸堤背後域のアマモ場は、地下茎のみで維持されているのではなく、種子の供給システムが確立されており、その過程の中でアマモや離岸堤などの海底面にあるものにトラップされた種子が海底面に着底して発芽、生育することによって、アマモ場として維持されていることが考えられた。潜水観察による離岸堤背後域での実際のアマモ実生株の発芽状況は、現存するアマモの周辺で実生株は多く、また離岸堤背後域の広範囲にわたり散在することも毎年確認されることから、計算結果と良い一致を示している。

離岸堤背後域中央部付近のアマモの消失原因としては、第4章で示したように潜水観察からも静穏な環境であることが確認されている。離岸堤背後域中央部付近はアマモ草体上への浮泥堆積による生長阻害、寄り藻の堆積によるアマモの枯死、他生物の浮遊幼生が集まりやすいためカシパン等の競合生物も生息適地として利用していることなどから、アマモが淘汰されて消失しやすい。今回の数値モデルからも離岸堤背後域中央部はアマモ種子も滞留しやすいと同時に、浮泥や他の生物も集積しやすいことも示されており、多様な生物が競合しやすい場所であることが示された。

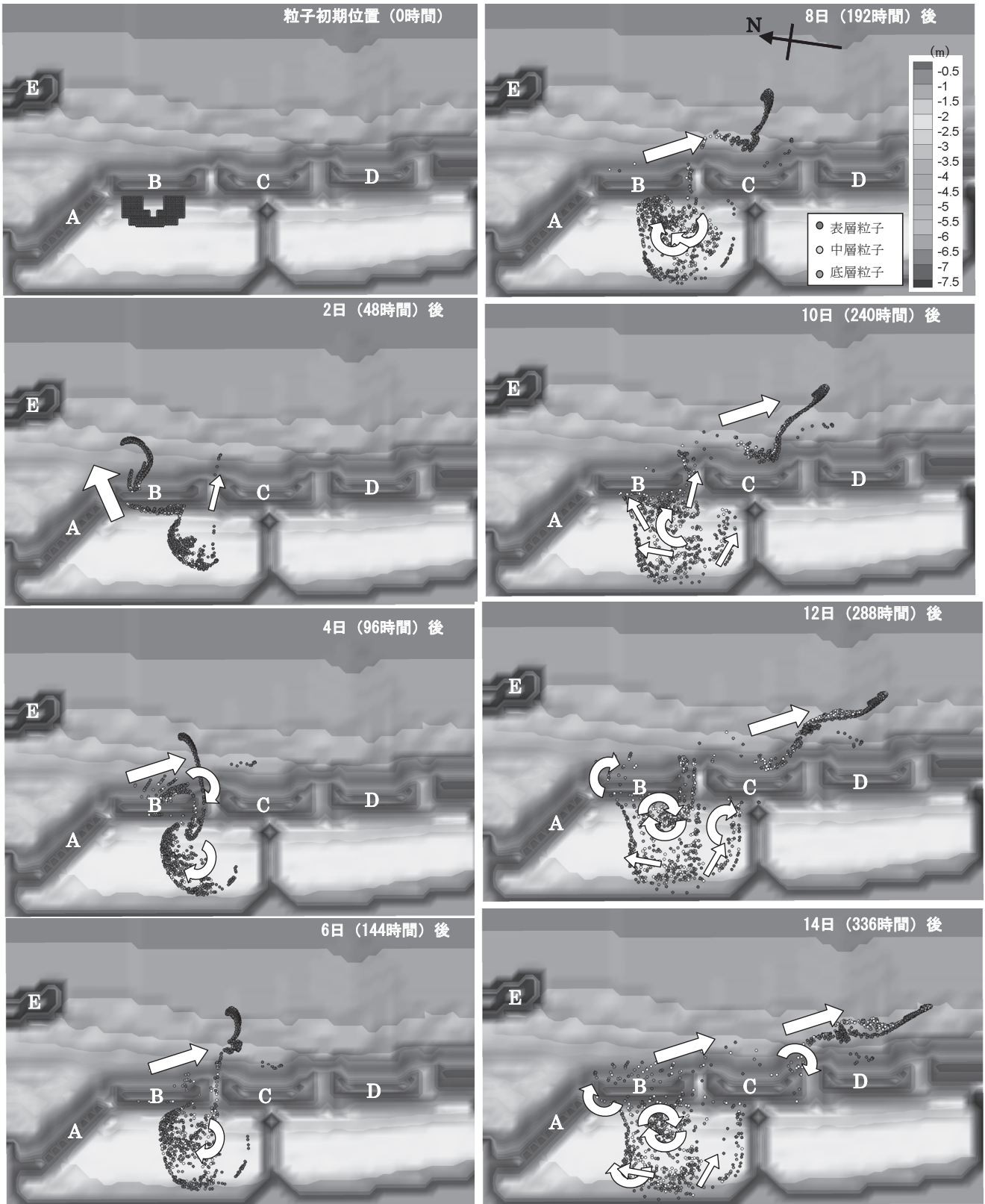


図 5.17 粒子の移送状況 (2日単位)

5.9 アマモ生育地における粒子滞留率

以上の計算結果から、粒子の移送機構が分かったものの、実際にどのくらいの粒子が生育可能なエリアに移送されるのかを定量的に評価するために、離岸堤背後域に現存するアマモ場周辺への粒子移送状況を滞留率として求めた。離岸堤背後域に種子が滞留すれば、潮流で種子が内湾を漂流し、現存するアマモ場や底質にトラップされ着底して、そこで発芽し、生育に至ると考えられる。このことから、図 5.18 に示した離岸堤背後域を粒子滞留の計算領域として設定した。

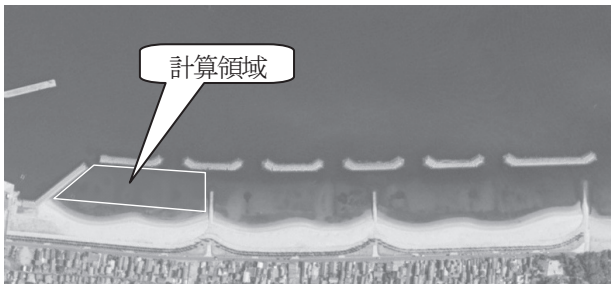


図 5.18 離岸堤背後域の設定滞留域

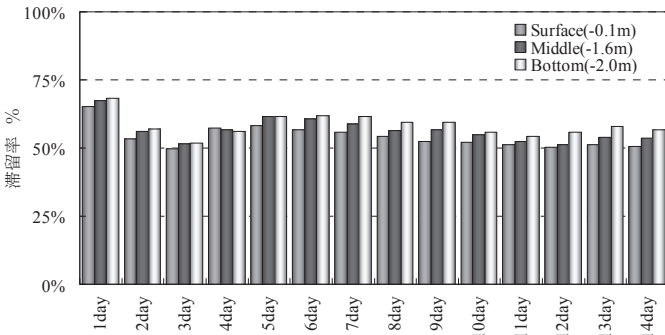


図 5.19 各層における粒子滞留率の時間変化

表 5.2 に離岸堤背後域における各層の粒子滞留状況、図 5.19 に各層における粒子滞留率の時間変化を示した。図 5.19 のように今回のシミュレーションでは、各層における滞留率は同じ傾向を示した。また、粒子の投入水深の違いでは、底層の滞留率がやや多い傾向を示した。粒子の挙動を全層でみてみると、離岸堤背後域での滞留率は、計算開始後から 3 日後まで潮流によって離岸堤前面域へ流出したため減少したが、粒子移送により 3 日後から離岸堤背後域に再度流れ込み、若干滞留率が上昇した。10 日後以降はほぼ横ばいとなり、全層でみると 50%程度の粒子が離岸堤背後域へ滞留する結果となった。また、粒子の配置状況を見ると、現状のアマモ分布と良く一致していた。

実際のアマモ種子の量は、アマモ場面積、花枝と栄養株の比率などで左右され、これらは年によっても変動が見られることから、アマモ種子の数を正確に推定することは困難である。第 2 章でも示したように、香川県海域ではアマモ花枝 1 本当たりの種子数は 30~150 粒であったので、これを平均し、花枝 1 本当たり 90 粒の種子が実ると仮定し、表 5.3 に示したように離岸堤背後域のアマモ場面積を 1,000 m²、2009 年 7 月調査結果²⁾から、m²当たりの株数を 34 株、花枝形成率を 10~20%とすると、およそ 46 万粒が対象とするアマモ場で生産されることになる。その中の約 50%にあたるおよそ 23 万粒が離岸堤背後域へ滞留することになる。これまでの当海域の調査結果から、アマモ種子の発芽率は 20%程度であるので、およそ 4.6 万粒のアマモ種子の発芽・生育が可能であると見積もられた。さらに流れ藻等によって他海域からの流入も考えられるので、それ以上のアマモ種子が離岸堤

表 5.2 離岸堤背後域における各層の粒子滞留状況

| 計算時間 (日) | 粒子滞留数 | | | | 粒子滞留率 | | | |
|-------------|-------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 表層 | 中層 | 底層 | 全層 | 表層 | 中層 | 底層 | 全層 |
| 1 | 334 | 345 | 350 | 1,029 | 65.2% | 67.4% | 68.4% | 67.0% |
| 2 | 273 | 287 | 292 | 852 | 53.3% | 56.1% | 57.0% | 55.5% |
| 3 | 254 | 264 | 266 | 784 | 49.6% | 51.6% | 52.0% | 51.0% |
| 4 | 294 | 290 | 288 | 872 | 57.4% | 56.6% | 56.3% | 56.8% |
| 5 | 298 | 315 | 316 | 929 | 58.2% | 61.5% | 61.7% | 60.5% |
| 6 | 290 | 311 | 317 | 918 | 56.6% | 60.7% | 61.9% | 59.8% |
| 7 | 285 | 301 | 315 | 901 | 55.7% | 58.8% | 61.5% | 58.7% |
| 8 | 278 | 289 | 304 | 871 | 54.3% | 56.4% | 59.4% | 56.7% |
| 9 | 268 | 290 | 305 | 863 | 52.3% | 56.6% | 59.6% | 56.2% |
| 10 | 267 | 281 | 285 | 833 | 52.1% | 54.9% | 55.7% | 54.2% |
| 11 | 263 | 268 | 278 | 809 | 51.4% | 52.3% | 54.3% | 52.7% |
| 12 | 258 | 262 | 285 | 805 | 50.4% | 51.2% | 55.7% | 52.4% |
| 13 | 263 | 276 | 297 | 836 | 51.4% | 53.9% | 58.0% | 54.4% |
| 14 | 259 | 275 | 290 | 824 | 50.6% | 53.7% | 56.6% | 53.6% |

背後域に供給され、再生産に寄与しているものと推定される。沈降した種子の発芽率は、周囲の底質・水質環境により差があるが、一定量の種子が供給されることにより、離岸堤背後域でアマモが発芽・生育し、アマモ場の維持に貢献しているものと推測された。今後、実海域での花穂を含めた種子の移送については、底質、風向風速、さらには海中のアマモ等の障害物などが関係してくることが考えられるので、このような条件を考慮し、より精度の高いシミュレーションを行うことで、高度な造成適地選定および評価を行うことができると考えられる。

参考文献 <第5章>

- 1) Fujiwara M, Yamaga K, Yoshimatsu S, Miyagawa M, Suenaga Y: 2011, Resaech on the appropriate condition for *Zostera* bed in the coastal area. Recent Advances in Marine Science and Technology 2010 PACON International, 12-21.
- 2) Fujiwara M, Miyagawa M, Suenaga Y: 2011, Field Research on The Appropriate Growth Conditions for *Zostera* Bed. Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, 3060-3067.
- 3) 藤原宗弘・山賀賢一・吉田吾郎・寺脇利信：2006, 離岸堤背後域での播種アマモの長期変動. 水産工学, 43(2), 173-177.
- 4) 中瀬浩太・田中裕一・檜山博昭：1992, 海浜変形予測手法を用いたアマモ場成立条件に関する研究. 海岸工学論文集, 39, 1006-1010.

第6章 結論

6.1 本研究の成果

本論文は、瀬戸内海の浅海域におけるアマモ場造成について、香川県海域でのアマモの生理生態的な特徴を把握し、モニタリング結果とアマモ生育環境条件についてシミュレーションを行い、現場海域での現象を定量的に評価し、アマモ場の拡大に向けた検討をすることを目的に研究を進め、今後行われるアマモ場造成にむけての有用な知見を得た。

以下に、本研究の各章で得られた結論をまとめて記す。

第2章では、瀬戸内海東部の香川県小豆島沿岸における海草類の分布状況およびアマモ群落の季節変化を把握した。確認されたアマモ群落のほとんどは、海底面の傾斜の影響により沖だし方向の広がりがほとんどみられず、海岸線に沿って細長く帯状に分布しており、瀬戸内海の面積の小さいアマモ場の特徴を確認することができた。

アマモ場の株密度と現存量の季節変化は、1月～6月頃の水温上昇期に実生株の加入と分枝による株の増加、花枝・栄養株の生長に伴い急激に増加した。その後、6、7月の花枝の枯死流出にはじまり、7月～9月頃の高水温期頃にはアマモ栄養株の枯死流出により株密度、現存量ともに急激に減少し、10月～12月頃の水温下降期では一年間の中でもっとも低い水準で推移することを確認した。国内の多年生アマモ群落の季節変化と比較して、土土地先のアマモ群落の現存量は平均的な値であったが、株密度、花枝の出現率はやや低い値であった。また、アマモ分布域も比較的短期間で変動していることも明らかとなった。これらの特徴を基礎的な資料：評価項目として把握し、より高度なアマモ場造成技術を開発するための有用な基礎的な資料を得ることができた。

第3章では、香川県における代表的な半閉鎖性内湾である屋島湾を対象海域として選定し、海域内のアマモ生息場の海域環境とその周辺のアマモが生息していない場の海域環境について現地調査を行い、アマモ生育環境要因について個々の取り扱いではなく、複雑な環境条件の相互関連性をニューラルネットワーク技術のひとつであるSOM（自己組織化マップ）を用いて、アマモの生育環境要因の評価を試みた。その結果、各要因相互の定量的な関連性までには到っていないが、生育環境要因の複雑な関わりの一部について検証することができた。中でも生育水深、水中光量、底質、潮流の状況が重要なアマモ生育条件であると考えられ、これらがそろえば造成はうまくいく可能性が高くなるものと考えられた。しかし、アマモの生育環境は場所毎で異なるため、造成予定場所で現地調査を行い、アマモの生活サイクルとアマモ場の変遷に合わせた時系列環境データを加えながら評価・分析モデルに適用し、検証していくことが必要であると考

えられた。事業に向けた取組みとして、アマモ生育環境要因の項目の絞り込みが重要であり、評価・分析および設計の効率化を促進するとともに、モニタリングの指標を簡素化することも重要な課題であると考えられた。

第4章では、比較的水深が浅い場所で光量が豊富であり、波浪の影響が軽減されているという条件を満たす香川県さぬき市津田湾の消波離岸堤背後域で播種・移植したアマモを長期間モニタリングし、アマモの生育制限要因を特定し、アマモのひろがり方やアマモの生長と成熟の特徴について明らかにした。

結果として、造成試験海域では12年以上継続してアマモが生育し、造成試験区内のアマモは天然区と同様の季節消長を示した。しかし、長期間にわたるモニタリングの中で、アマモ場の拡大速度は緩やかで、広がる場所では年間20～50cm程度のスピードであったが、試験期間中にアマモが消失した試験区も確認され、消波離岸堤背後域が一様な環境条件ではなく、様々なイベント（台風による強烈な波浪、循環流による他生物の蟻集や浮泥の堆積、草食魚の侵入など）により、アマモ場の減少や消失が起こりやすい場所もある事が確認された。特に消波離岸堤背後域中央部は浮泥や浮遊性アオサなどの寄り藻が堆積しやすく、他の競合底生生物類も盛んに増殖し、近隣の天然アマモ場よりもアマモの生育にとって厳しい条件であることが目視観察により確認された。また、近年の全国的な水温上昇傾向により今後は、外洋域から侵入してくる植食性魚類等の過剰摂食についても増加する可能性があるため、これらの要因も視野に入れたアマモ場造成を検討する必要があると考えられた。

第5章では、第4章で長期モニタリングを実施した香川県さぬき市津田湾の消波離岸堤周辺において、アマモ種子（花穂を含む）の移送について、3次元マルチレベルモデルを用いた潮流計算およびオイラー・ラグランジュ法によるアマモ種子（花穂）を粒子にみたてた粒子追跡計算を行い、現存するアマモ場の維持機能および生育適地について検討を行った。その結果、従来の手法よりも精度を向上させるため、消波離岸堤周辺の海底勾配を考慮した詳しい地形モデルを適用した数値シミュレーションモデルを構築することができ、対象海域の流動場を精度よく再現することができた。

今回の計算結果では、離岸堤背後域においては、アマモ種子（花穂）が50%程度滞留することが確認され、アマモ場の維持は地下茎によるものだけではなく、種子による再生産が行われていることが明らかになった。しかし、現地モニタリングでも明らかになったように離岸堤背後域が一様な環境条件ではないことも示され、離岸堤背後域の中央部でアマモの衰退が見られている原因として、離岸堤背後中央部にむかう流れ（回折波によって生じる循環流）の形成により、中央部に漂流ゴミ・浮泥や競

合生物などが集まりやすく、アマモの生育に不適な環境になる可能性が示された。また、離岸堤開口部においては、台風等のイベント発生時には波浪による砂面の移動が大きく、アマモ栄養株が流出してしまうことが観察されているが、10~15cm/s程度の適度な潮流（実測値では最大流速が6cm/s程度）による海水の動きは、アマモ草体上の浮泥や付着生物を除去する働きもあり、アマモの生育に必要なことが明らかとなった。

以上のことから、日本全国に分布するアマモは場所毎で形態が大きく異なっていることが判明した。特に香川県海域のアマモは株密度に対して現存量が大きく、栄養株は太くしっかりしており、これは海域の流速、底質が影響しているものと考えられた。また、花枝の形成率は他の海域と比較して小さく、アマモ場としての維持機構は主に地下茎による株分かれであるものと推定された。また、全ての栄養株が花枝となる単年生アマモについては、本研究では議論をしていないが、備讃瀬戸海域でもスキューバ潜水等を利用したアマモの生育環境の調査が進むにつれて、単年生アマモが生育する場所も少なからず確認されてきている。アマモは、その海域の環境に対応した形で、その生態的な特徴が変化しているものと考えられ、今後、陸上水槽等での培養試験等、更なる研究が進むことを期待する。無作為にアマモ場造成を行うのではなく、アマモが生育している環境条件を細かく把握することが重要な課題であり、それを再現することでアマモが生育できる環境を整えていくことが重要であると考えられる。

本研究の成果として、全国の海岸に存在する消波離岸堤を利用し、アマモ種子の移送・滞留状況を検討項目に加え、アマモ場造成適地を評価することが可能な先進的なシミュレーションモデルを構築することができた。しかし、消波離岸堤はあくまで消波目的で設置されており、このような海岸構造物を利用し、アマモ場造成を行うためには、どのような形状・規模・配置の構造物が必要であるか、さらには既存の離岸堤の改修時にも、単に土木的な工事を行なうという視点だけでなく、地域経済を考慮した豊かな沿岸域を形成できる可能性があるアマモ場造成適地を増やすことにも着眼し、生物生産性を考慮した構造に変更していくよう検討、提案を行っていく必要がある。例えば、本研究フィールドでは、現存する離岸堤背後域のアマモ場は、現状では生育限界に近い形で分布していると考えられ、さらなるアマモ場造成を行う場合、現在のままの環境下では生育場の拡大はあまり期待できない。離岸堤背後域の中でも、背後域中央部はアマモの生育に適さない、かつあまり他の有用生物に活用されていない場所になってしまっていることから、潮流が弱い場所に消波離岸堤のような構造物を設置する場合、

海水交換を促すために、消波離岸堤の幅を短くすること、潮流（最低でも6cm/s）を最大限利用できるような配置にすること、浮き消波堤や消波潜堤の採用も視野にいれること等を考慮する必要がある。

特に海水交換を促すことによって、水質、底質環境が改善され、生物にとって好適な環境となりうる可能性が高い。金銭的な問題もあるが、これらのことを考慮することで、身近な沿岸域から豊かな海にしていく必要があり、そうすべきであると信じている。現在、瀬戸内海は水質の改善²⁾により、海域の透明度が徐々によくなり、アマモの分布域は徐々に水深のある沖合に拡大しつつあるが、アマモ場が拡大することで、アマモ場にトラップされるN（窒素）量も多くなり、徐々に生態系が太く大きくなり、以前のような豊かな海になることを期待したい。

6.2 今後の課題

本研究においては、消波離岸堤周辺の流動場から新たな数値モデルを開発して、アマモ場造成適地を評価したが、実海域での種子（花穂）の移動については、底質、風向風速、さらには海中のアマモ等の障害物などが関係してくることが考えられるので、このような条件をさらに考慮してモデルを改良していくことにより、精度の高い造成適地選定および評価を行うことができると考えられる。

また、アマモ場の衰退、生育不良等の生育環境の改善には、その状況に応じた最適な対策をとる必要があることから、造成されたアマモ場と近隣の現存する天然のアマモ場を並行してモニタリング²⁾し、現状を把握した上で順応的な維持管理を行う必要がある。そのためにも、図6.1に示したような海中のアマモ繁茂状況をリアルタイムでモニタリング可能なシステム³⁾を導入して監視しながら、競合生物の除去や消波離岸堤の改良を適宜行っていくことも必要である。

公益性の高い藻場造成事業は、瀬戸内海では公共事業として実施されており、ガラモ場造成においては、自然エネルギーを利用した流動制御機能を持つ生物生産力の高い新規藻場造成構造物の開発⁴⁾も行われている。アマモ場造成は、地方では公共事業として実施されつつあるが、東京湾や大阪湾のような人口が密集している都会では、市民参加型の環境修復事業の一環として行われている。今後、香川県を含む瀬戸内海でも、アマモ造成計画を策定・実践していく場合には、計画に対する地域住民（漁業者）の合意形成と維持管理への地域住民（漁業者）の理解と協力が必要であり、より理解しやすいアマモの生育環境要因の評価・分析から計画立案、メンテナンスに至る一貫したシステムの構築が必要であり、リアルタイムで観察できるような簡便なモニタリング手法の導入や、自然環境条件、地域の地理・社会要因を含む多次元

情報の分析並びに結果の表示が可視化可能な SOM などのソフトコンピューティングの評価手法の適用を進めていく必要がある。

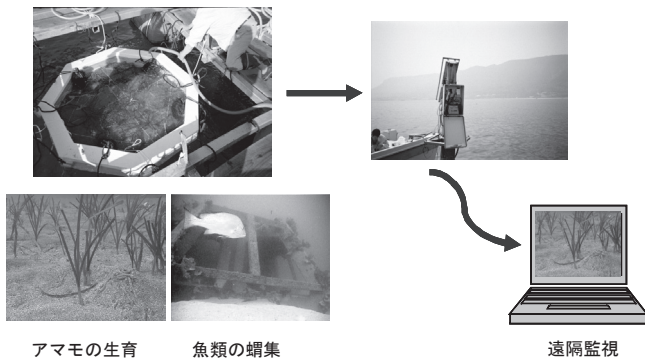


図 6.1 リアルタイム海中モニタリングシステムの例

最後に、2011年3月に発生した東日本での震災による汚染物質の海域への流出は、海域環境の悪化と同時に豊かな水産資源生産力の低下を招いてしまった。震災域においても、失われた漁場の整備が展開されていくことが予想されるが、その施策の中心となるのが、基礎生産力増強のためのアマモ場をはじめとする藻場・干潟の造成となるのは明らかである。これらの造成は、豊かな沿岸域の構築、地域振興につながることであり、瀬戸内海をはじめ全国的にも社会的意義が大きいといえる。本研究の成果は地域社会・産業の活性化および発展に資するところが多く、同時に公益性の極めて高いものになり得ると確信している。

参考文献 <第6章>

- 1) 多田邦尚・藤原宗弘・本城凡夫：2010, 瀬戸内海の水質環境とノリ養殖. 分析化学, 59(11), 945-955.
- 2) 玉置仁・寺脇利信・吉田吾郎・岡田光正：2001, アマモの天然群落と移植群落における季節消長の比較. 藻類, 49, 195-197.
- 3) 末永慶寛：2011, 漁場環境監視システムの開発, 空・海・大地と環境へのモニタリング. 電子情報通信学会誌, 94(10), 877-879.
- 4) Miyagawa M, Tochino M, Aminaka M, Fujiwara M, Suenaga Y, Kakegawa H: 2009, Research on the Safer Shelter for Released Fish Juveniles. PACON International, Recent Advances in Marine Science and Technology 2008, 8-14.
- 5) 末永慶寛・宮川昌志・山中稔・藤原宗弘・星野高士・堀田健治：2005, 水産資源増殖構造物の流動制御と生物蠕集機能. Journal of Eco-Engineering, 17(2), 115-120.
- 6) Miyagawa M, Fujiwara M, Suenaga Y: 2011, Research on the Seaweed Rootage by Current Control Structure. Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, 1210-1217.
- 7) Yamanaka M, Yasuoka K, Nagatomi T, Kakegawa H, Suenaga Y: 2011, Research on Important of Bottom Sediment Environment by Porous Material. Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, 3160-3167.

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始情熱を持って有益かつ貴重なご指導をいただいた、指導教員の末永慶寛教授に対し、謹んで心より深甚の感謝の意を表します。また研究活動のみならず、各種活動の機会を与えて下さったことで、若い学生たちと豊かな交流ができ、本当に有意義な3年間を過ごすことができました。ここにあらためて謝意を表します。

副指導教員として、貴重かつ適切なお助言、励ましをいただきました香川大学大学院工学研究科長 増田拓朗教授、香川大学大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 松島学教授、愛媛大学大学院連合農学研究科 多田邦尚教授に心より感謝申し上げます。

さらに、本研究を行うにあたり、叱咤激励を頂いた安全システム建設工学専攻長 長谷川修一教授、前専攻長野田茂教授をはじめとする安全システム建設工学科の諸先生方に感謝の意を表します。また、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 山中亮一講師の熱心な協力と数多くのお助言なくしては、本研究の遂行は困難であったことを記すとともに謝意を表します。

社会人の筆者に対して、大学での研究の機会を与えてくださいました元香川県水産試験場長の吉松定昭博士、長い期間同僚として見守ってくださいましたが志半ばで急逝された山賀賢一主席研究員ほか職員の皆様には、貴重なお助言やご指導をいただきました。特に香川県水産試験場主席研究員であると同時に、末永研究室の先輩でもある宮川昌志博士には、調査や考察の方法、とりまとめ等々、数多くの熱心かつ丁寧なお指導をいただきました。ここに深く感謝いたします。

このほか、研究活動の遂行にあたり、多くの方からご指導、ご助言をいただきました。日特建設(株)技術部主任 安岡かおり博士、韓国海洋研究所責任研究員 安熙道博士、独立行政法人水産工学研究所 首席研究員であると同時に末永研究室の先輩である明田定満博士、独立行政法人瀬戸内海区水産研究所 生産環境部長 寺脇利信博士、同藻場干潟研究室主任研究員 吉田吾郎博士に心よりお

礼申し上げます。

本研究に限らず、公私にわたってご支援、ご協力をしてくださいました、(株)中電技術コンサルタント 植田拓朗氏、香川大学大学院工学研究科博士前期課程末永研究室在籍 小奈裕典氏に改めて感謝いたします。特に高砂水産代表、高砂一義様には、周年にわたる潜水技術、荒れた海でもものともしない操船技術、旬の魚介類の知識・料理方法など、多くの知識、技術を教えていただきました。心より感謝いたします。