

海草群落の再生に向けた保全・修復学的研究
－物理条件より評価した海草群落の分布－

日本大学大学院生物資源科学研究科

中瀬浩太

2021

目次

第I章 緒言	1
I-1 海草群落の構成種	1
I-2 海草群落の現状	1
I-3 海草群落の生態的機能	3
I-4 海草群落の保全・修復技術開発	3
I-5 海草群落分布場所の物理的条件的評価の経緯	5
I-6 本研究の目的と論文構成	7
第II章 播種および播種マット設置実験	10
II-1 はじめに	10
II-2 育成実験	12
II-2-1 育成実験方法	12
II-2-2 室内育成実験結果	15
II-3 苗床育生	19
II-3-1 海底設置用苗床作成方法	19
II-3-2 苗床育成結果	22
II-4 海底設置	26
II-4-1 苗床設置	26
II-4-2 海底設置結果	28
第III章 アマモ場の成立条件	34
III-1 海浜変形手法を用いたアマモ場成立条件	34
III-1-1 はじめに	34

III-1-2	調査方法	36
III-1-3	数値計算	42
III-1-4	数値計算による外力算定結果	54
III-1-5	計算結果とアマモ分布の比較	67
III-1-6	考察	74
III-2	他地点との比較	79
III-2-1	はじめに	79
III-2-2	千葉県富津市相沢下地点と島戸倉地点	80
III-2-3	神奈川県横須賀市小田和湾	94
III-2-4	考察	100
III-3	結論	103
第IV章	実際のアマモ場造成への適用	104
IV-1	はじめに	104
IV-2	三原市地先におけるアマモ移植事業	105
IV-3	機械化施工によるアマモ移植	110
IV-4	船舶航跡波による移植場所の評価	115
IV-4-1	はじめに	115
IV-4-2	調査目的	116
IV-4-3	現地調査	119
IV-4-4	観測結果	126
IV-4-5	航跡波を用いたシールズ数の算出	131
IV-4-6	結果の評価	137
IV-5	事後モニタリング	140

IV-5-1	はじめに	140
IV-5-2	モニタリング方法	141
IV-5-3	モニタリング結果	143
IV-5-4	移植結果の考察	146
第V章 他種の海草への適用		151
V-1	はじめに	151
V-2	コアマモへの適用	152
V-2-1	コアマモの移植実勢	152
V-2-2	コアアモ移植実験	154
V-2-3	結果および考察	164
V-3	ウミシヨウブへの適用	166
V-3-1	はじめに	166
V-3-2	調査方法	169
V-3-3	現地調査結果	175
V-3-4	考察およびまとめ	191
第VI章 総括		193
謝辞		203
引用文献		205

第I章 緒言

I-1 海草群落の構成種

海草とは、陸上で進化した顕花植物が再び海中に生活圏を移動させたものであり、沿岸浅海域の砂・泥・礫底、岩礁域に分布し、種子と地下茎で増殖する。これらの海草は、大場・宮田(2007)によれば、わが国で1目（オモダカ目 ALISMATALES）5科10属30分類群が知られている。

我が国の九州以北の沿岸の比較的波浪の穏やかな砂泥質の浅い海域には、海草群落は分布している。この海草群落は、主としてアマモ・コアマモ・タチアマモから成立しており、「アマモ場」と総称されている。これらの海草群落は、アマモ科（ZOSTERACEAE）アマモ属（*Zostera*）より構成され、アマモ（*Zostera marina*）、コアマモ（*Z. japonica*）、タチアマモ（*Z. caulescens*）が主体である。この他に北海道以北にオオアマモ（*Z. asiatica*）、岩礁域に分布するものとしてスガモ属（*Phyllospadix*）のエビアマモ（*Phyllospadix japonicus*）やスガモ（*P. iwatensis*）などがある。

南西諸島にも海草が分布しているが、九州以北のアマモ場とは構成される科や属が異なる。ここでは、ベニアマモ科（*Cymododeaceae*）ベニアマモ属（*Cymodocea*）のベニアマモ（*Cymodocea rotundata*）、リュウキュウアマモ（*C. serratifolia*）、トチカガミ科（HYDROCHARITACEAE）ウミシヨウブ属（*Enhalus*）のウミシヨウブ（*Enhalus acorodes*）などが主な群落構成種である。なお、ウミシヨウブは、赤道付近の熱帯が分布の中心であり、八重山諸島が分布の北限である。

I-2 海草群落の現状

環境庁（現在：環境省）は、現地調査および漁業協同組合・自治体の水産担当者・試験研究機関などに対する聞き取り調査に加え、航空写真によって確認する方法により海藻草群落の面積を評価している。環境庁(1980)による第2回自然環境保全基礎調査では、1978年度の調査により明らかになった日本全国に存在する海藻および海草群落の面積が182,727haであり、そのうち海草群落であるアマモ場が41,333ha（総海藻草群落面積の22.6%）であった。その13年後に発表された環境庁(1994)による第4回自然環境保全基礎調査では、1989年～1991年に行われた調査により全国の藻場の総面積が201,212haであり、そのうちアマモ場が49,464ha（総海藻草群落面積の24.6%）であったと報告している。

この2つの調査の間に全国の現存海藻草群落面積の3.2%に相当する6,439haが消失した。この消失した群落の19.9%に相当する2,044haがアマモ場であると推定されている。アマモ場など海草群落消滅の原因は、埋立など直接改変が28.1%、磯焼けが14.7%、その他海況変化などが16.2%、不明が40.6%などと集計され、「磯焼け」、「その他海況変化など」も「不明」に合わせると71.5%となる（消滅藻場面積の0.4%はコンブの乱獲によるものである）。なお、環境省は2018年度から2020年度まで海藻草場の分布調査を実施しているが、この調査は衛星画像の解析によるものであり、それ以前とは調査方法が異なる。

環境庁(1994)によれば、海藻草群落の衰退は、殆どの場合、消滅してから気付かれるのが現状である。大部分の海藻草群落では、水温、照度、濁度などの環境要因と生物の変化を継続的にモニタリングされていないので、その原因を推定することが困難である。一方、日本では、現在、埋立ての代替補償として人工干潟や人工藻場を造成させている。移植されたアマモ場が拡大したという場合、それは元々アマモが生息していた場所に限られている。

これらの海草群落は、その面積を減少させていることや沿岸の生態的機能が認

識されていることから、保全と修復が必要とされている。

I-3 海草群落の生態的機能

沿岸の海草群落が沿岸生態系上および漁業上有用な物であることは、古くから認識されている。アマモ場を対象とした生物群集については、布施(1962)が述べているようにアマモ場が各種生物のいろいろな発育段階における生活空間として沿岸生態系や水産資源の増殖に重要な役割を担っていることが以前より良く知られている。これらの機能や物質生産については、時岡ら(1972)や新崎ら(1976)および相生(1996)にも詳述されている。

環境省(2004)は、それまで得られた海草群落を含む藻場の特徴や機能を整理してとりまとめた。そここれによれば、海草群落は、各種生物群集が生息場として三次元空間を形成し、海草の地上部、地下部などそれぞれに生物生息空間を形成している。この海草群落を利用する生物群集は、海草葉上のベントス群集、群落内を遊泳し自由に出入りする魚類やイカ類などの遊泳生物群集、および海草群落の海底上や底質内に生息するベントス群集などであると述べている。また、海草群落には、物質循環機能として一次生産および有機物分解、物質循環、また生物の共存機能として生物多様性の維持、幼稚魚育成、餌料供給、産卵場形成、および環境保全機能として水質浄化、底質安定化、環境形成・維持があることが述べられている。

I-4 海草群落の保全・修復技術開発

アマモを中心とする海草群落の修復については、1970年代より各種の技術開発が行われている。これらの成果をとりまとめた海草群落修復のマニュアルや手引き書が既に作られている。

電力中央研究所の川崎ら(1988)によるアマモ場造成法に関するとりまとめは、それまでに実施された発芽、移植、生長の各段階に関わるそれぞれの実験結果より導かれた結果が示されており、近年発行されたマニュアルなどで言及されている内容を殆ど網羅している。港湾局が主導してとりまとめた海の自然再生ワーキンググループ(2003)、マリノフォーラム 21(2007)によるマニュアルにおいてもそれまでの知見が整理されている。これらのマニュアルには、実際に行われた海草群落造成技術に関しても紹介されている。また、漁業者用のマニュアルとして具体的かつ簡便に種子確保、播種、移植などの方法を示したものとして三重県水産研究所(2011)によるアマモ場再生ハンドブック、熊本県水産研究センター(2014)による漁業者のためのアマモ場造成マニュアルがある。

一方、海草群落を保全するためのマニュアルは多いとは言えない。環境省(2004)は、「藻場の復元に関する配慮事項」というタイトルであるが、復元措置について環境影響を回避・提言することを優先すべきことを述べている。また、復元場所の選定については、対象海域における海草の制限要因を明らかにしてから検討すべきであるなどとの言及している。

アマモなど海草群落の修復技術については、現在に至るまで殆ど同様な内容が述べられている。海草群落の修復の具体的方法は、播種、天然苗あるいは育苗の移植、天然群落の移設である。播種の場合は、直接海中に種子を散布する方法、種子をシートなどに仕込む方法、および種子を貝殻や他材料と混合して海底設置する方法がある。これらの技術については、現在に至るまで大きな変化がみられない。

修復する場所に対する条件として水深、底質の粒度組成、有機物量、栄養塩、各種栄養塩濃度がいずれのマニュアルでも示されている。これは、それぞれの調査地点で計測されたものである。多くのマニュアルや海草群落造成技術の研究で

は、水深、底質の粒度組成、有機物量、栄養塩、各種栄養塩濃度についての記述が豊富である。

現在までに試みられているアマモ場の造成技術は、以上のように播種や株の移植が大部分である。播種や株移植の適地選定に関する研究については、大部分が底質条件や水深が対象である。一方、アマモを中心とする海草群落を造成する場合の移植や播種の場所が満たすべき物理的条件としては、川崎ら(1988)のように底質の砂面変動量が 5cm/日以内、流速 3.5~6.5cm/s 以下、沖波の年間有義波高の最小値が 1.0m 以下などの記述がある程度あり、アマモ移植場所を造成する設計方法が確立するには至ってなかった。しかし、本研究を含む波や流れの条件を再現計算して海草群落分布域の条件を抽出する方法が行われるようになってからは、一部ではあるが底質安定性について言及されるようになってきた。

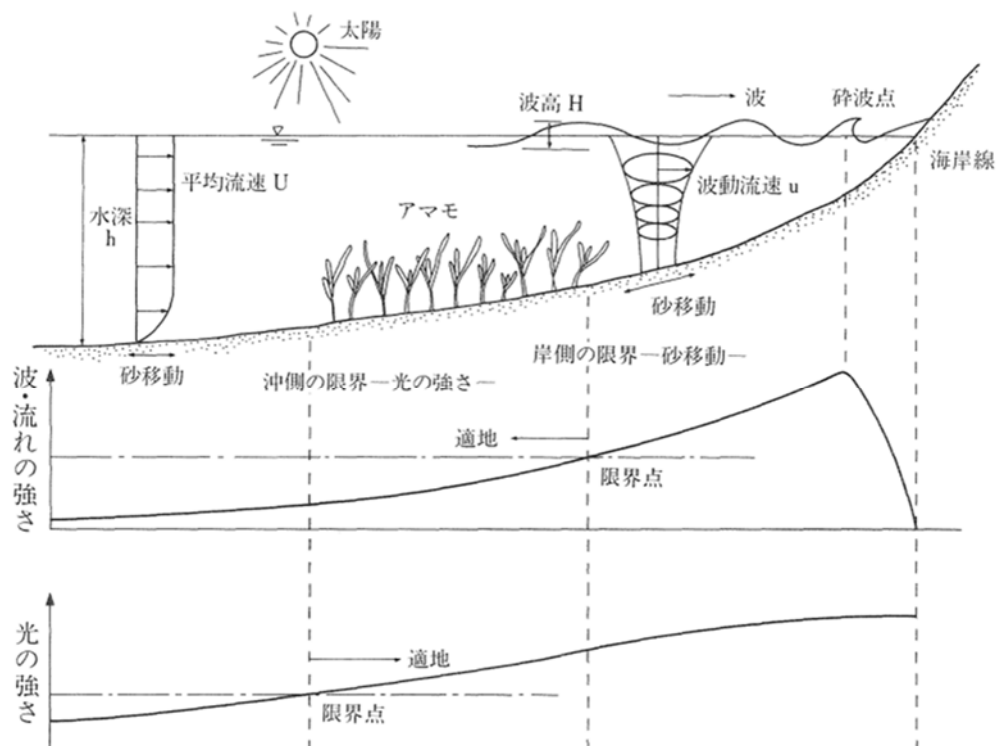
アマモ場の外力による条件が明確になっていない原因は、アマモ場が海の中で面的に広がっているのに対して、波高、流速、砂面変動などのデータはスポット的に測定されていることが考えられる。そこで、本研究では、アマモ場が分布している海域について底質の安定状況を面的に把握するために、海岸工学分野で一般的に用いられるようになった波や流れや底質安定性の数値計算を行い、この結果とアマモ場の分布を比較し、アマモ群落状況の関係について考察を行った。

I-5 海草群落分布場所の物理的条件的評価の経緯

沿岸海域においては、時岡ら(1972)のように常に波浪や潮流が作用しており、その帰結として地形や底質が形作られている。勿論、海草の分布可否についても波や流れ、および底質の安定性が関係すると考えるのが自然である。しかし、波や流れと海草との関係についての研究も多いとは言えない。

沿岸海域の底質内に生息する生物にとっては、底質が安定していることが重要

な生息条件である。これに早期に着目した研究については二枚貝のウバガイを対象とした研究事例がある。波浪により底質が大きく攪乱する場所でウバガイは、安定して生息することができない。この底質の攪乱状況を定量的に評価するために中村ら(1990)は、海岸工学や河川工学で使用されるパラメータであるシルズ数を用い波浪によるウバガイ稚貝の輸送と減耗という視点を加えた。



図I-1 アマモ場の2つの生育限界 (丸山ら 1987)

このシルズ数をアマモ群落分布に当てはめた極めて重要な先行研究が丸山ら(1987)により報告された。この研究では、アマモ群落の分布域が光条件と底質安定性により決定づけられることを示しており、代表的な海草であるアマモの分布がシルズ数を用いて決定され得ることを示した。図I-1に示すように波浪が作用する沿岸部では、アマモの岸側分布限界がシルズ数など波浪による底質安定性によって決定される。一方、水深が大きくなり、海底に対する波浪の影響が

少なくなる沖側におけるアマモの分布限界は、海底に届く光によって決定されるとした。しかし、これらの研究では、物理的パラメータの平面的な広がりについてまで検討していなかった。これは、当時、底質安定性を精度良く面的に再現できる数値計算手法が開発されていなかったことによる（丸山ら 1987）。

この重要な先行研究を基に当時最新の海底地形の安定に関する数値計算手法を用いて波浪が作用する沿岸に分布する海草群落はどのような波や流れの条件の場所に分布するかを平面的に明らかにした。これにより、海草群落の分布条件を定量化し、修復適地や保全すべき場所を明らかにすることができると考えた。

波・流れ・底質安定性など物理的条件の平面分布を実測により把握することには非常な労力と経費がかかり、実際に行うことが困難である。また、高波浪時には計測自体も困難であることも多い。港湾・河川・海岸分野で用いられている数値計算による再現手法は物理的条件を面的に把握できる利点がある。これらの数値計算手法の結果は現地適用性も確認されている。そこで、海草群落の分布を決定づけると考えられた波浪条件が作用する場合の底質安定性に関する数値予測計算結果を用いて、実際に海草群落が分布する場所とその周辺について物理的条件分布の再現計算を行い、これらの結果を現地調査による海草群落の分布と比較することにより、海草群落の分布し得る条件を抽出することを試みた。その結果、アマモ場の分布範囲は、数値計算による底質移動状況により説明されることが明らかになった。これらの成果は、2000年以降に表された海の自然再生ワーキンググループ(2003)やマリノフォーラム 21(2007)によるアマモ場造成に係るマニュアルにも取り入れられるようになった。

I-6 本研究の目的と論文構成

本研究の目的は、アマモを中心とする海草群落を修復することであり、そのた

めに修復する場所を波や流れなどの物理的要因から明らかにしようとした。また、海草群落の保全を考える場合にも、保全の重点地域の設定する上でも、群落が分布可能な物理条件を明らかにする必要がある。

本論文の構成は次のとおりである。

(1) 播種および播種マット設置実験

当初は、波や流れが海草群落の成立可否に大きな影響を及ぼすと考えていなかった。このため、各種先行研究と同様に種子の採取、播種、育苗、苗の移植というプロセスでアマモ群落造成の技術開発を行った。そして、実際に海域に設置した状況を観察した結果、アマモの生育にはアマモが分布する海底の底質安定性が重要であると考えられるきっかけとなった。ここで行った実験のプロセスにおいて、アマモ分布と底質安定性を関連付けるに至る結果を示した。

(2) アマモ場の成立条件

アマモ苗床を海底に設置した結果より、アマモ移植場所の底質安定性がアマモ生育の条件になることが示唆された。そこで、アマモ分布の現地調査、および同一海域における波・流れおよび底質安定性について数値計算による再現計算を行った。これらのアマモの分布平面分布と物理的条件平面分布を比較することにより、アマモ分布の物理条件を抽出した（中瀬・田中 1992）。

複数のアマモ場について同様の検討を行い、アマモ分布に係る物理的条件の普遍性を評価した（中瀬・田中 1993）。

(3) 実際のアマモ場造成への適用

アマモ移植事業に対して、上記の検討により評価したアマモ場成立の物理条件を用いてアマモを移植する場所の条件を確認した（中瀬ら 1999）。また、移植後のモニタリング結果より、物理的条件がアマモ移植場所を計画する上で必要な条件であることを確認した。

(4)他種の海草への適用

数値計算により評価した物理条件とアマモ以外の海草の分布について比較を行った。この結果より、アマモ以外の海草でも数値計算より求めた物理条件がその分布を評価する上で有効であることを確認した。対象の海草は、大都市付近の内湾部でも移植可能と考えられたコアマモ、ならびに八重山諸島にのみ分布する絶滅危惧種で保全が求められているウミシヨウブとした。

コアマモについては、人工干潟上での移植実験により抽出したコアマモが生育可能な場所の状況について、数値計算により求めた底質安定状況と比較した（中瀬ら 2020）。

ウミシヨウブについては、西表島北西部の広域を対象として、既存調査結果による本種の分布と数値計算により再現した波高や底面流速分布などと物理的条件の分布を比較して、その分布可能な物理条件を抽出した（中瀬ら 2015）。さらに、1年間の月別の外力再現計算結果より、どのような波浪条件を用いればウミシヨウブの分布が明確に説明出来るかを検討した（中瀬ら 2016）。

第II章 播種および播種マット設置実験

II-1 はじめに

アマモ場造成については、特に電力立地に対する漁業補償を目的として 1970 年代より着手されていた。1980 年当時、消失したアマモ場を復元あるいは造成する技術の研究が各地の試験試験研究機関において試みられていた。当時、研究されていたアマモ場造成技術は、大別すると以下の 3 種類であった。

- 1) 海底に直接播種する
- 2) 苗を育成して海底に移植する
- 3) 生育している株を採取して移植する

これらの方法は、基本的に現在においても大きくは変化していないが、大規模化、機械化という面で進歩が見られる。

播種については、ガーゼなどに種子を仕込んで海底に設置する技術を土木工事で行う規模に拡大する技術がある。また、天然に生育する苗の移植については、建設機械を用いて底質ごとアマモ株を採取して移植地点にそのまま移植する技術が開発されている。さらに、育苗した苗を市民活動として移植する事例も行われている。

これらの技術のうち、自然に生育しているアマモ栄養株を採取する方法は、採取するアマモ場が沿岸の開発行為によって消滅する場合以外、かえって自然のアマモ場に被害を与えることになる可能性が大きい。そこで、アマモ群落に対する影響が少ないと考えられる群落内の花枝を採取し、それから種子を採取する方法を採用することとした。また、アマモ種子の発芽率および発芽後生残率が自然状態では高くないことが想定されたことから、採取した種子を管理下で発芽育成させ、かつ密度の高い群落を造ることにより移植後の活着率が高くなることを期待

した。

なお、アマモは、漁業権漁業のうち、第一種共同漁業権の「採藻」の範疇に含まれており、漁業者以外の者がアマモの種子を入手使用する場合、都道府県知事宛に特別採捕許可申請を行う必要がある。

これらのアマモを育成する方法については、1980年代に十分な成果が上げられているものが少なかった。この原因として、当時はアマモの発芽、育成技術が未完成であったこと、移植あるいは播種したアマモ場の造成規模が小さいこと、および海底に播種あるいは移植後の波浪などにより消失あるいは埋没してしまったことではないかと推察された。そこで、海底に一举にアマモの生育密度の高い空間を形成して、上記のような要因を解決しようと考え、陸上の張り芝のように生育密度の高い苗床を直接海底に設置することを試みた。移植海草の密度が高いことにより、地下茎が底質の安定性を確保し、葉が波浪を軽減することを期待した。

この技術の実用化には、アマモが高密度に育成できる基質が必要であった。そこで、水田の自動田植装置に対応するロックウールマットを基質として採用した。ロックウールマットは、製鋼スラグを高熱で溶解し、これを吹き付けて冷却し繊維状にした材質であり、自動田植装置に用いる苗代用基質としており、現在でも広く使われているものである。ロックウールマットは、重量が小さく（軽く）、空隙率が高く、さらに一定期間の後に製鋼スラグ熔融によるガラス状繊維を結びつけている接着剤が分解し、底質と融合してしまうという利点がある。しかし、ロックウールマット自体に強度は殆ど無く、簡単に手でちぎることができる。

このロックウールマット上にアマモの種子を配置し海水水槽内で発芽させ、海域に設置しても流失しない程度までアマモを生長させた苗床を育成する。その後、このアマモの苗床を海底に設置して、一举に密度の高いアマモ場を造成する技術

の開発を試みた。当時、アマモの種子の採取と保存、発芽、発芽後の育成、海底設置後の生残と成長については、それぞれの要素技術について幾つかの研究機関により研究されていたものの、一連のシステムとして提案されたものが存在していなかった。

II-2 育成実験

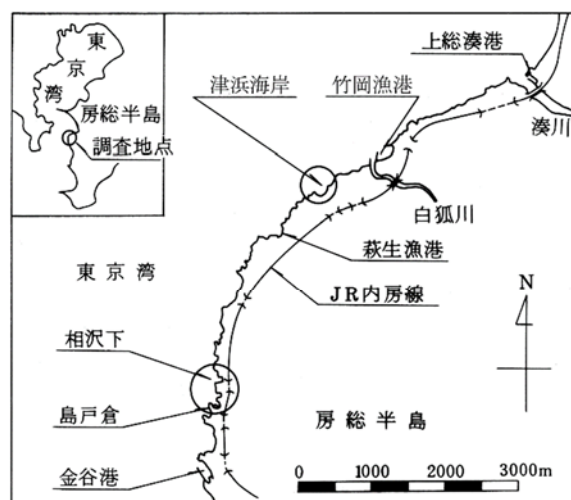
II-2-1 育成実験方法

アマモ場造成を行うための高密度な苗床を造成するためには、種子を確保する必要がある。種子の確保のためには、天然のアマモ群落より花枝を採取し、成熟した種子を取り出す。そこで、アマモが分布している海域において、漁業者に委託あるいは特別採捕許可を取得して自らアマモの花枝を確保した。

採取した花枝を水槽内で養生し、花穂および種子を成熟させた後、種子を採取し、播種時期まで保存した。この種子を水田苗代用ロックウールマット上で発芽させ、陸上水槽内で育成した後、海底に設置した。

(1) アマモ花枝採取場所

アマモの花枝採取は図II-2-1に示す千葉県富津市地先のアマモ群落で1988年6



図II-2-1 アマモ花枝採取地点

月 18～20 日、1989 年 6 月 3 日、1990 年 6 月 26～27 日に実施した。

千葉県富津市周辺は、千葉県東京湾外湾に面しており、背後地が比較的急な山地となっている。富津市上総湊地区から金谷地区にかけては、主に岩礁海岸が分布しているが、部分的に岩礁に囲まれた小さな湾に形成される砂浜、ポケットビーチが存在している。富津市天羽漁業協同組合の漁業者および上総湊港で事業を行っている海洋土木会社や潜水作業員よりヒアリング、および船上、陸上より目視観察を行ったところ、富津市竹岡地区から金谷地区にかけて分布する幾つかのポケットビーチには、アマモ (*Zostera marina*) を主な構成種とするアマモ場が存在していることが明らかになった。

この富津市天羽漁業協同組合管内で確認されたアマモ場は図Ⅱ-2-1 に示した以下の 3 地点である。

- ① 富津市津浜地区津浜海岸（通称「竹岡海岸」）
- ② 富津市島戸倉地区 1（通称「相沢下」）
- ③ 富津市島戸倉地区 2（通称「島戸倉」）

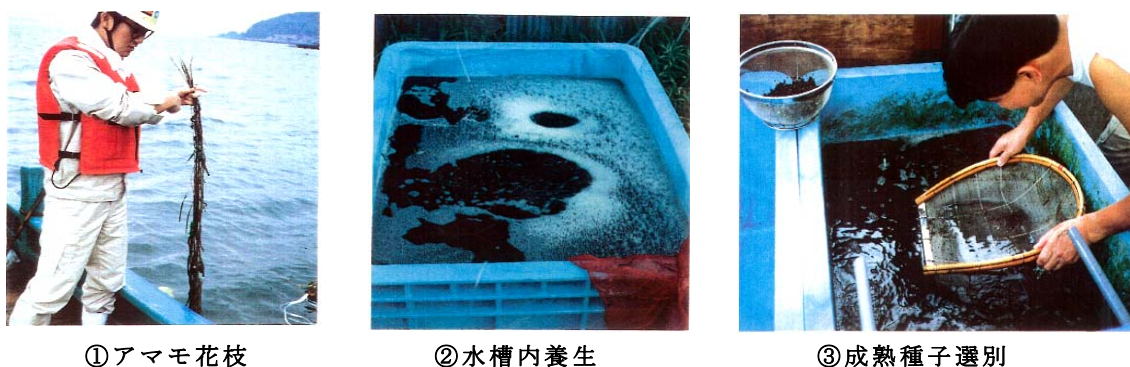
竹岡津浜海水浴場は、陸側に 50m×300m 程度の砂浜が形成されており、海水浴場として利用されている。流入河川は存在していない。

相沢下は、汀線が国道の護岸となっており、砂浜が形成されていない。岩礁の間隙には、砂が堆積しており、その中央部分が 100m×300m 程度の砂底となっている。竹岡海岸に分布するアマモ場は、水深 T.P.-4.0m 付近に分布しており、アマモ場の分布範囲沖側にタチアマモ (*Z. caulescent* : 現地での通称「大アマモ」) が分布している。なお、相沢下の沖合約 3,400m の場所には、浅瀬があり、高波浪発生時に碎波が確認されている。

島戸倉も岩礁に囲まれた小さなポケットビーチである。この場所は、10m×50m 程度の小さな砂浜を背後に持ち、その海中部分にアマモ場が形成されてい

る。

当該地点のアマモ場は、夏季 6 月～7 月に最も繁茂する時期であり、それ以降急激に減少し、11 月～12 月の発芽期までが最衰退期であることが漁業者よりのヒアリングおよび事前の現地踏査により把握されていた。



図II-2-2 アマモ種子採取状況

(2) 種子採取方法

千葉県富津市天羽漁協管内のアマモ場において、成熟期のアマモ花枝を採取し、現地の海水を入れてエアレーションを施した 400ℓ 水槽内で養生させて種子の成熟および鞘の分解を促進させた。花穂採取後約 2 週間で種子は、成熟し、またその鞘が分解して水槽底に沈殿する。この沈殿物を水槽中で「箕」で種子とそれ以外に選別した。成熟した種子は、川崎ら(1988)に従い、26%の食塩水に投入したアマモ種子のうち、沈殿した種子のみを選別回収した。これらの要領を図II-2-2に示す。

採集した種子は、塩分 33（現場海水の塩分）および 20 に設定した人工海水（商品名「アクアマリン」）を満たした 5ℓ 容器中に配置し、5℃あるいは 20℃に設定した冷蔵庫の中でエアレーションによる好気的環境下で保存した。これは、アマモが嫌氣的雰囲気になると発芽することを防ぐためである。

(3) 発芽実験方法

水稲苗代用ロックウールマットを用いて海底設置用のアマモ苗床を作る目的で表II-2-1に示す各実験ケースでアマモ種子の発芽率を計数した。

表II-2-1 発芽実験ケース

年度	実験ケース	内容	水温	日照	種子数	実験開始日
1988	A	マット穿孔・種子挿入	室温	自然状態	各450粒	12月15日
	B	上記に加え1cm厚で覆砂				
1989	A	種子を水槽底に放置(無処理)	20℃ 恒温槽	12L/12D	各100粒	11月26日
	B	種子を砂中(層厚1cm)に埋没				
	C	マット上に種子配置+覆砂(層厚0.5cm)				
	D	マット上に種子配置(配置のみ)				
	E	マット上に種子配置+覆砂(層厚0.5cm)				
	F	マット穿孔・種子挿入				
1990	A	マット上に種子配置(配置のみ)	10℃ 恒温槽	10L/14D	各100粒	11月6日
	B	マット上に種子配置+覆砂(層厚0.5cm)				
	C	マット上に種子配置+覆砂(層厚0.5cm)・砂に腐葉土30%混入				

アマモ種子と播種基質を W30cm×D20cm×H20cm の透明プラスチック水槽に配置し、これに各 9ℓ の人工海水を入れてエアレーションを施した。実験に使用した人工海水の塩分は、塩分 33 および 20 とした。

発芽とは種子より少しでも芽が出た段階のことを言うが、本研究では安全側を考慮して緑色の子葉が確認された時点「発芽」と定義した。

(4) 播種密度実験方法

播種密度の相違による生残率について 1988 年に実験を行った。播種基質には、日鐵商事製水田苗代用 50cm×77cm×5cm のロックウールマットを用い、60ℓ のプラスチック水槽底に配置し、表II-2-2 に示す条件で播種密度を設定した。アマモ種子をロックウールマット表面に約 1cm の溝を穿孔して種子を配置した。その後、発芽数および生残個体数を計数した。

II-2-2 室内育成実験結果

(1) 種子採取および保存結果

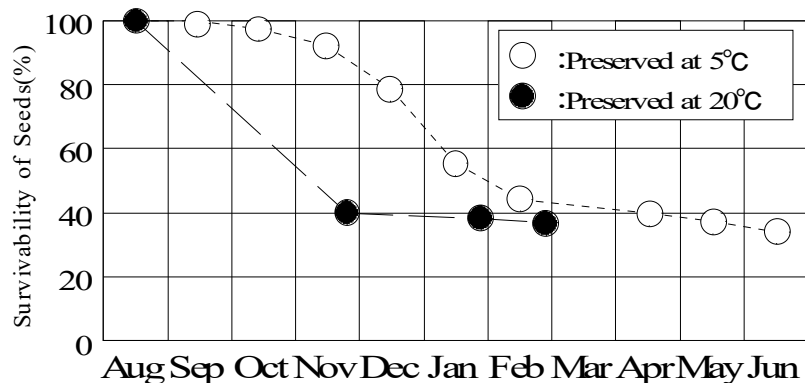
採取した花枝の本数およびこれより採取された種子数を表II-2-3に示す。播種に用いた種子数は、幡手ら(1981)に従い回収した種子を26%食塩水投入後に沈降した種子数を示している。種子の重量は0.011~0.016g/粒、花枝1本あたりの種子数は8~25粒であった。

表II-2-2 播種密度実験条件

種子密度(粒/m ²)	10,000	75,000	5,000	2,500
マット播種数	3,550	2,888	1,925	963
育成条件	温度	エアコン調節(実験期間中5~20°C)		
	海水	塩分33 砂利による循環ろ過		
	光	室内(屋根は寒冷による遮光)		

表II-2-3 花枝採取数および種子確保数

採取年月日	1988年6月18・19日	1989年6月3日	1990年6月26・27日
花枝採取場所	竹岡海岸	竹岡海岸・島戸倉	島戸倉
採取花枝数	1800本	2500本	1200本
養生条件	屋外水槽	室内・25°C	室内・25°C
養生日数	14日間	14日間	28日間
採取種子数	45,000粒	20,000粒	14,000粒
種子数/花枝1本	25粒	8粒	12粒
種子重量	0.016g	0.011g	0.011g
種子保存温度	5°C	5°C	20°C
保存時塩分	33	33	20
準拠論文	幡手ら(1981)	川崎・飯塚(1988)	
保存期間	4ヶ月	9ヶ月	7ヶ月
種子生存率	-	38%	40%



図II-2-3 保存中種子の生残率

種子は保存条件下でも発芽してしまう。発芽直後の幼芽は容易に腐敗し、周辺の種子に腐敗が拡大する傾向が認められた。このため、発芽種子と腐敗種子を概ね 7 日おきに除去し、人工海水も全量交換した。種子は保存中においても発芽し、発芽した幼芽は枯死するとすぐに腐敗する。5℃で保存した 1989 年度および 20℃で保存した 1990 年における保存条件下での種子生存割合を図Ⅱ-2-3 に示す。なお、生残率は腐敗種子数／当初採取種子数を%で表している。

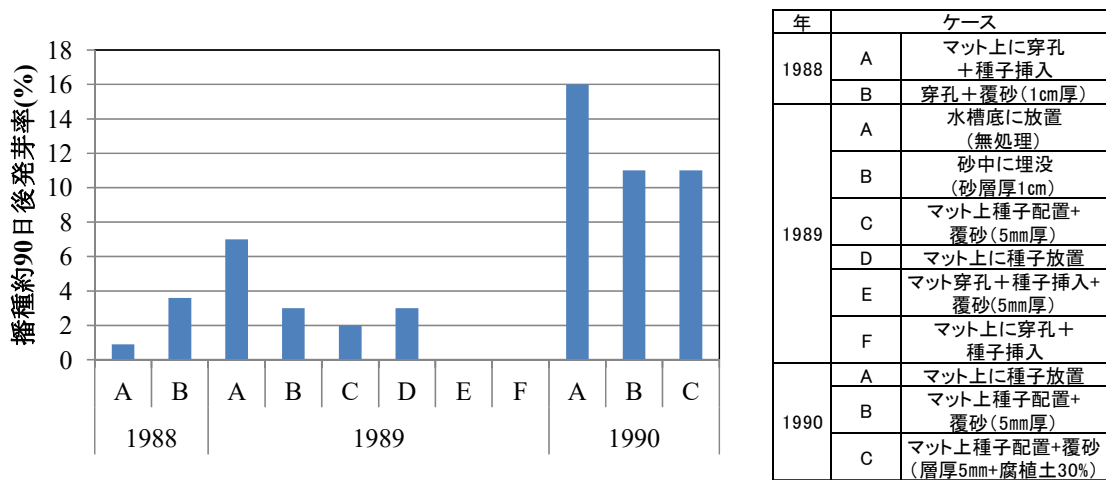
5℃での保存温度では徐々に発芽個体が増加（＝生残率が低下）したのに対して、20℃の保存温度では急激に生残率が低下した。しかし、いずれの保存温度でも約 40%程度の生残状態であった。

(2)水槽内発芽育成実験結果

各実験ケースにおける実験開始 90 日後の播種数に対する発芽個体の割合を図Ⅱ-2-4 に示す。

1988 年度の実験では、ロックウールマット上に約 5mm の深さで穿孔し、ここに種子を各 1 粒挿入したもの、この上に層厚約 5mm で覆砂したものの発芽率を比較した。実験は室温条件下（18～25℃）で日照管理をせずに実施した。ロックウールマットに穿孔しただけのケースの発芽率は 8 粒/450 粒=1.8%であったのに対して、覆砂したケースでは 16 粒/450 粒=3.6%とロックウールマット穿孔のみのケースに対して 2 倍の発芽率であった。

この 2 ケースのみではロックウールマットの適用性を評価できなかったため、1989 年度の実験でもこの実験を踏襲し、ロックウールマットのみ、および覆砂の組み合わせで発芽率の計測を行った。しかし、図Ⅱ-2-4 に示すように播種後約 90 日の発芽率は最大でも種子を水槽底に放置した無処理区の 7.0%であり、播種基質の相違を評価することができなかった。これは、アマモの発芽適温の約 10℃と比較して実験条件水温が 20℃と高かったためであると推察される。

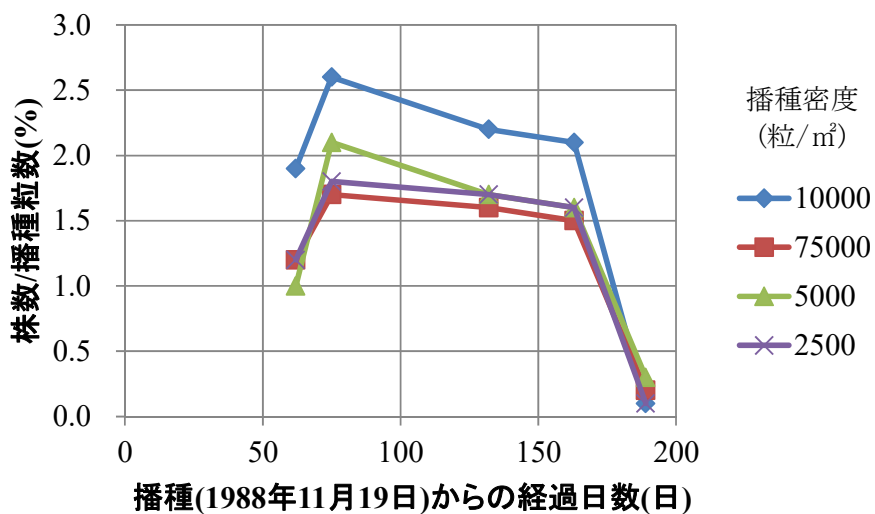


図II-2-4 各実験ケース別播種90日後発芽率

1990年度の実験では、川崎ら(1988)による実験結果を参考に実験条件を10℃とした結果、発芽率が12~16%に向上した。しかし、覆砂した場合とロックウールマットに種子を挿入しただけのものとの相違は明確でなかった。

(3) 播種密度実験結果

播種密度別のアマモの生残状態を図II-2-5に示す。ここで言う生残率とは、全播種した種子数に対して確認されたアマモ株(子葉)数の%を示す。発芽が確認



図II-2-5 播種密度別生残率

された播種約 2 ヶ月後（62 日後）～75 日後の間に生残数が増加しているが、これは新たに発芽した種子によるものであり、それ以降、生残株数が減少した。

発芽個体の生残状況は、播種後 163 日の 5 月初旬までは播種密度に関わらず 1.5～2%程度であった。なお、それ以降、急激にアマモが枯死し始めて、播種数に対する生残率は 5 月末（播種後 189 日）に 0.1～0.3%となった。

II-3 苗床育生

II-3-1 海底設置用苗床作成方法

1991 年 6 月に採集した保存アマモ種子を用いて 1990 年 2 月 26 日～1991 年 7 月 2 日まで 126 日の期間中、海底設置用発芽種子マットによる苗床の作成実験を行った。実験場所は、**図 II-3-1** に示す東京湾奥部の千葉県市川市千鳥町の埋立地とした。

アマモの育成は、**図 II-3-2**、**図 II-3-3** に示す装置を用い、地先で取水した海水を掛け流し状態で実施した。アマモ苗床は、外寸 80cm×110cm×高さ 70cm の

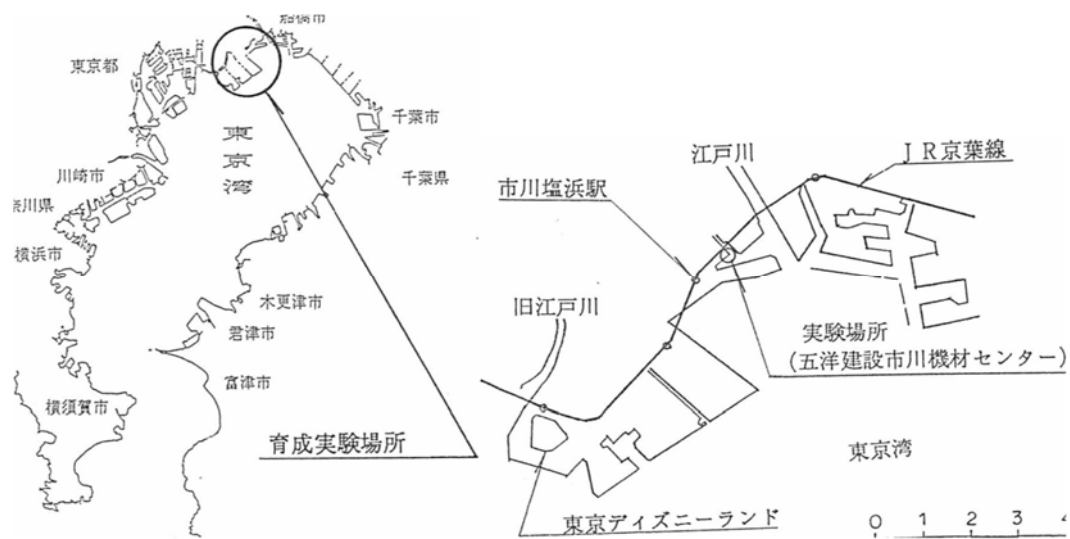
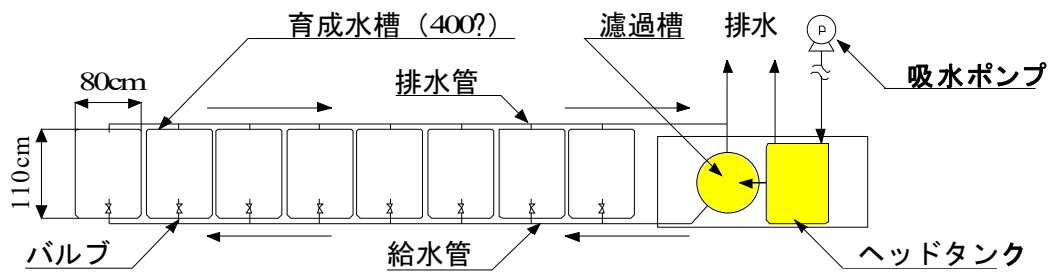
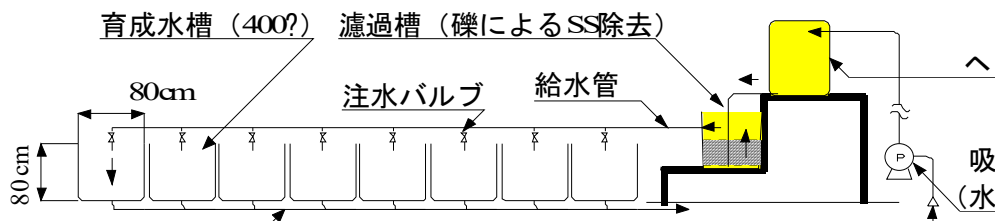


図 II-3-1 苗床設置場所



育成水槽平面図



育成水槽側面図

図II-3-2 アマモマット育生装置図



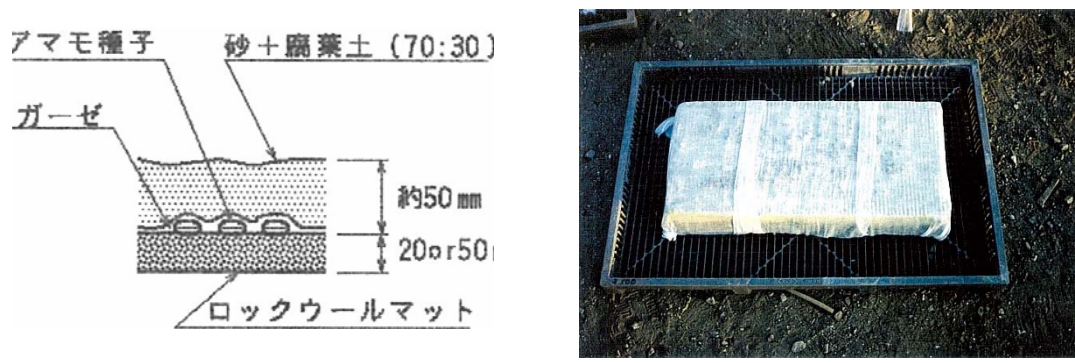
① 水槽注水部



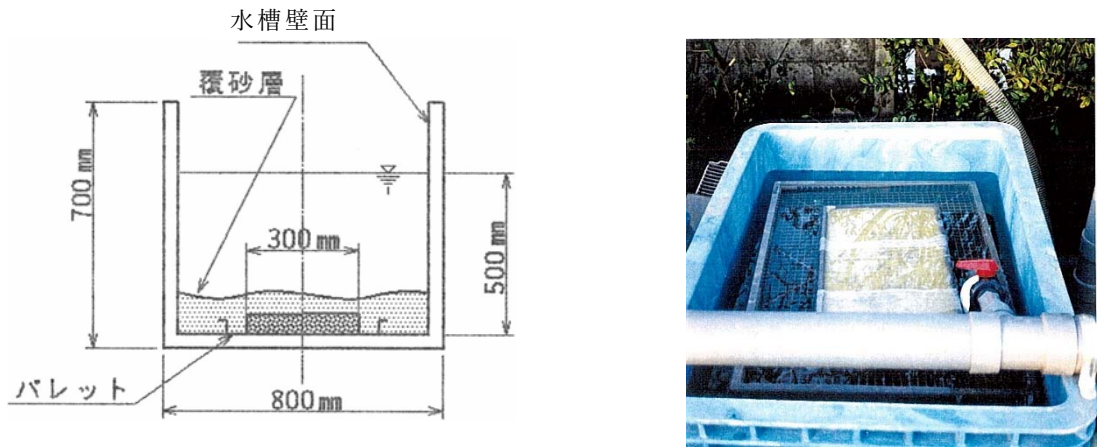
② 育生装置全景

図II-3-3 育生水槽の状況

0.4 m³ のプラスチック製水槽内に設置した。なお、当該地点の海水は懸濁成分が多いと考えられるため、汲み上げた海水を 20cm の層厚に敷いた直径 2~4mm の細礫（大磯砂）を用いて簡易的にろ過した。海水汲み上げには 1.75kw 水中ポンプを用い、水槽 1 基あたり 2 時間に 1 回程度の換水率で海水を供給した。



図II-3-4 アマモ種子配置要領



図II-3-5 アマモマット水槽内設置要領

アマモ種子配置密度および種子設置方法は、育成実験結果より設定した。即ち、播種密度は約 2,500 粒/m²、種子配置方法はロックウールマット上に種子を配置し、その上を砂+腐葉土でカバーするものとした。

アマモの種子は、図II-3-4 および図II-3-5 に示す要領で播種基質の 50cm×77cm×厚さ 5cm および 3cmの日鐵商事製水田苗代用ロックウールマット（面積 0.35m²）にそれぞれ 1,000 粒（2,597 粒/m²）配置し、種子が移動しないように種子の上をガーゼで覆い、種子が嫌氣的条件になるようにその上に約 5cm の厚さに市販園芸用腐葉土を 30%混合した砂（d₅₀≒0.4mm の市販園芸用砂）を散布して種子

を被覆した。実験中、水槽の水位は 50cm を維持した。

育成期間中、アマモの発芽個体数の計数、発芽済個体状況の目視観察（個体数、葉長の観察）および育成水槽中の水質分析（温度、栄養塩類）を実施した。

II-3-2 苗床育成結果

1989 年度および 1990 年度の実験においては、アマモの葉長が約 15~20cm 程度になる 5 月中旬以降にアマモ幼株が一斉に枯死してしまい、実験を中止した。しかし、1991 年度においてアマモは枯死せずに伸長した。ここで得られた苗床を海底設置に用いることとした。播種した種子に対する発芽率は低く、最終的生残率が播種数に対して 2%程度であった。

(1) 苗床育成中の環境

育成実験期間中の水槽内の海水温は、アマモ育成水槽中の水温を観察日の午前 10:00 に温度計で測定したものである。図 II-3-6 に示すように、播種時の水温は、約 10℃程度であったが、育成期間中徐々に上昇し、6 月初頃に一時的に 30℃近くに達した。

水質分析は、育成期間中 2 回実施した。分析に供した海水は、アマモを育成している水槽中より採集した。表 II-3-1 のように、窒素、リンおよび COD が

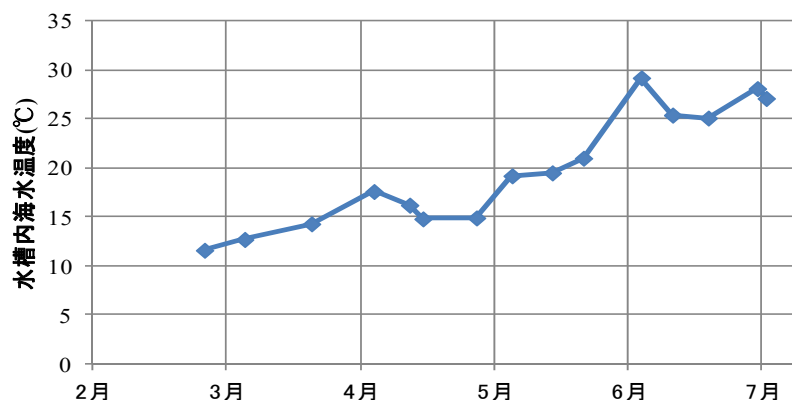


図 II-3-6 実験期間中水槽内海水温度測定結果

表II-3-1 実験期間中水槽内海水温度測定結果

項目	測定結果(mg/l)		生活環境の保全に関する環境基準(海域)(mg/l)				
	5月1日	6月21日	B類型	C類型	Ⅱ類型	Ⅲ類型	Ⅳ類型
NH ₄ -N	0.24	0.44			≤0.3	≤0.6	≤1
NO ₃ -N	0.01	0.01					
NO ₂ -N	0.02	0.64					
T-N	0.27	1.09					
T-P	0.17	0.29					
COD	4.4	2.7	≤3	≤8			

注) T-Nは3態窒素の合計値であらわした。

汚濁海域である C 類型あるいはIV類型に相当する値を示した。

育成に用いた海水は細礫を用いてろ過したが、細かい懸濁物がかなり混入しており、これが水槽底に2~3 cmの厚さで沈澱した。しかし、懸濁物によって水面より水槽底が視認出来なくなることはなかった。

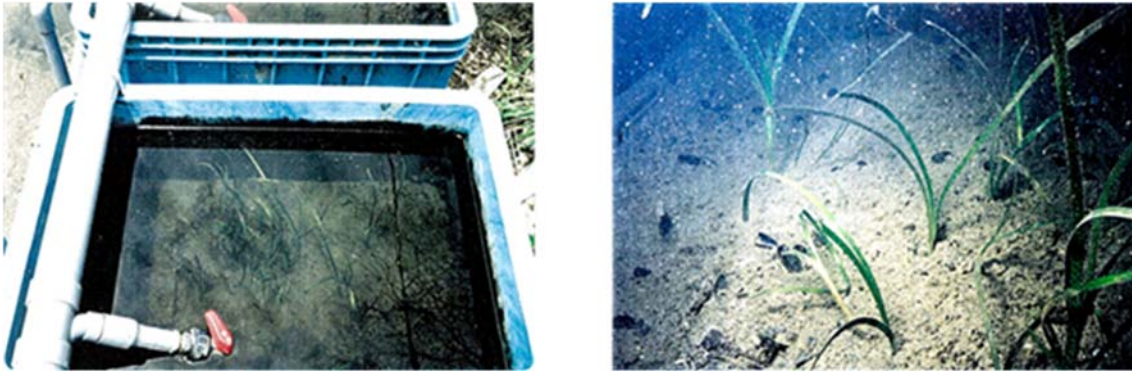
水槽および配管内にはムラサキイガイやシロボヤといった付着生物が付着し、しばしば海水の流通を阻害した。さらに、緑藻類と思われる繊維状の植物がアマモ葉上に付着することが認められた。これら配管内およびアマモ葉上の付着生物は、週に1回の点検時に除去した。

(2) 苗床育成状況

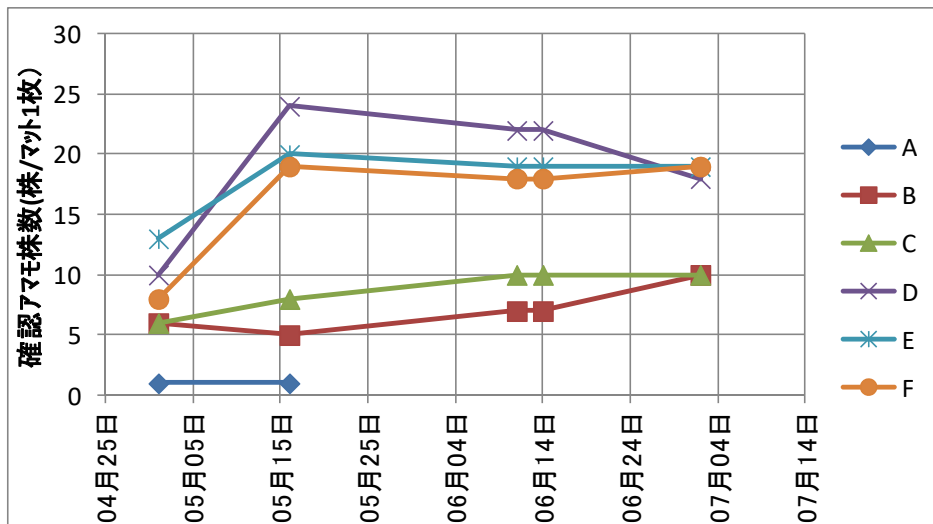
アマモ種子は1991年2月26日に6枚のロックウールマットについて各1,000粒播種し、その後1週間に1回程度の観察を行った。水槽内のアマモ生育状況を図II-3-7に示す。

播種後38日の1991年4月5日に上軸胚、播種後64日後の1991年5月1日に子葉を確認した。株数のカウントは、5月1日に子葉が確認された以降に実施した。各水槽内で観察されたアマモの株数は、図II-3-8に示す状況で推移した。発芽後、子葉まで生長した株は、その後殆ど枯死しなかった。

2月26日に播種して7月2日時点の播種数に対する生残率は、表II-3-2に示す



図II-3-7 水槽内アマモ生育状況



図II-3-8 水槽内アマモ株数 (A～Fは水槽識別記号)

表II-3-2 生残株数

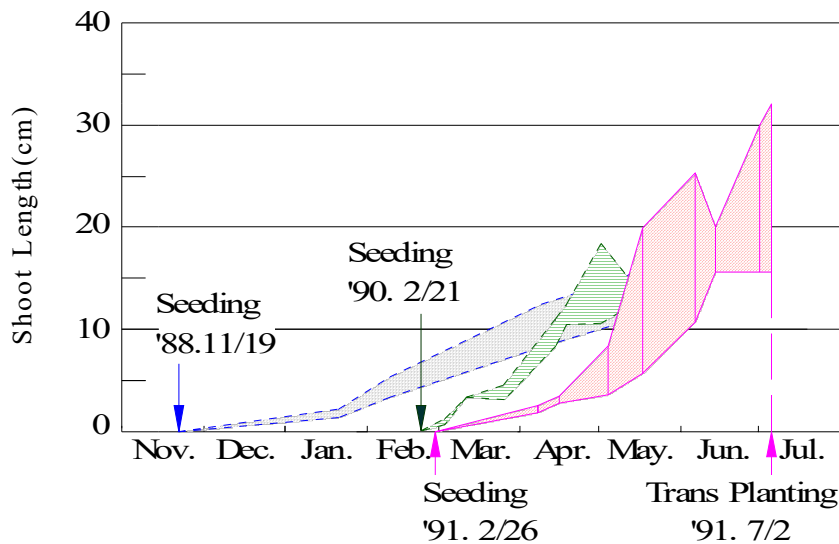
マットNo.	播種数 (粒)	最大発芽 株数(本)	最終生残 株数(本)	発芽後生 残率(%)	播種数に 対する生 残率(%)
A	1000	1	放棄		
B		10	10	100.0	1.0
C		24	18	75.0	1.8
D		20	19	95.0	1.9
E		19	19	100.0	1.9
F		10	10	100.0	1.0
平均値(マットAを除く)		16.6	15.2	94.00	1.52

ように 1.0～1.9%（平均 1.52%）であった。

この現象は、過去 2 年間の実験で 5 月中旬以降にアマモが急激に枯死する時期においても認められなかった。これは、実験を行った海域が富栄養であり、海水中に十分な栄養塩類あるいはその他の生育に必要な成分を含んでいることによるものと推察された。

アマモ育成マット No. A のみ発芽本数が 1 本と少なかったため、5 月 15 日時点で葉長約 20cm の予備育成株を 22 本移植した。このマット上の株数は、分蘖により 7 月 2 日時点で 26 本になっていた。

これらの育成期間中のアマモ最大葉長を図Ⅱ-3-9 に示す。なお、図Ⅱ-3-9 には、本年度の育成実験とほぼ同一時期（1990 年 2 月 21 日）に播種した種子の生長状況および 1988 年 11 月に播種したアマモの生長状況観察結果も合わせて表す。



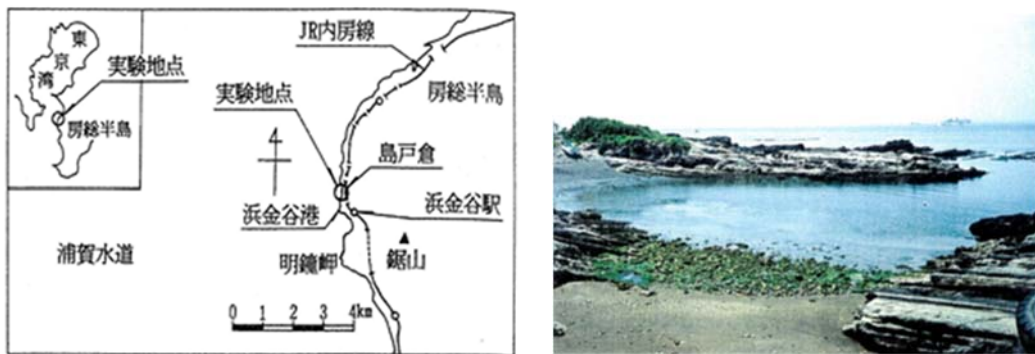
図Ⅱ-3-9 アマモ水槽内生長状況

II-4 海底設置

II-4-1 苗床設置

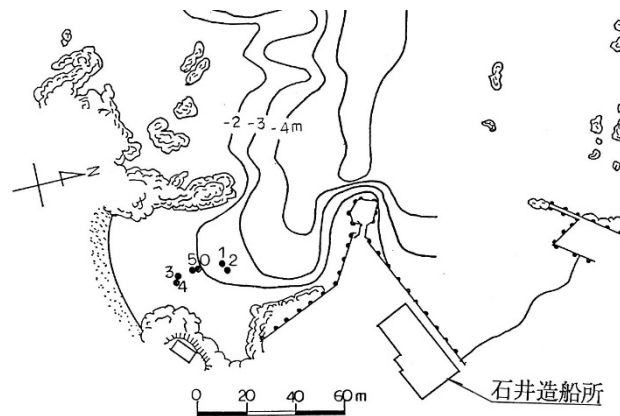
(1)海底設置方法

千葉県市川市の育成実験施設で育成したアマモの苗床 5 基を 1991 年 7 月 3 日に図II-4-1 に示す千葉県富津市島戸倉地先海城の水深 C.D.L.-1~2m の場所に設置した。この場所は、荒天時の高波浪から遮蔽された場所であり、近傍に天然のアマモ場が分布していた。アマモ苗床マットは、現存するアマモ群落と同一の波



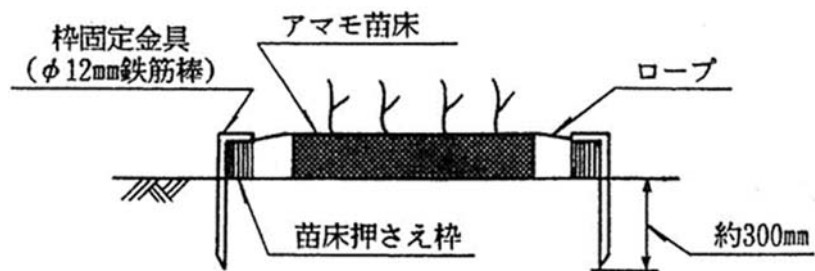
① 移植地点位置図

② 島戸倉海岸の状況

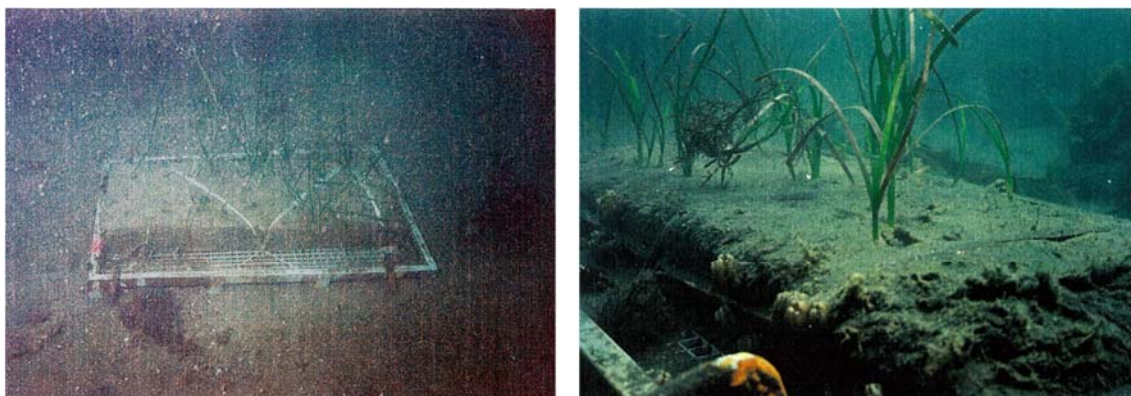


③ 海底地形図と移植場所

図II-4-1 育成マット海域場所



図II-4-2 アマモ苗床海底設置容量



図II-4-3 アマモ苗床海底設置状況

や流れを受けるように、天然のアマモ群落に隣接して設置した。

それぞれのマットは、プラスチック製の枠に結束テープで固定し、図II-4-2 および図II-4-3 に示すように海底に鉄筋棒にて固定した。移植時のアマモ葉長（初期値）は15～32cmであった。

(2) 観測方法

設置したそれぞれのアマモ苗床マットについて、1991年7月2日～1992年7月2日までの1年間、概ね1ヶ月ごとにスキューバ潜水によりアマモ株の生残数と葉長などを観察・記録した。

II-4-2 海底設置結果

(1)運搬時および設置直後の損耗

マットは水槽に入れた状態で市川から富津までトラックで運搬したが、運搬途中にマットに覆砂した砂が動揺により流亡してしまった。運搬中の脱落株は、予備苗として海底設置時にそれぞれのロックウールマットに振り分けて移植した。

設置したアマモ苗床のうち、No. 1、3、4は、設置後約1ヶ月の1991年8月3日の時点においてマットが流出していた。これは高波浪の影響と考えられた。なお、1992年8月以降、マット流出は認められなかった。

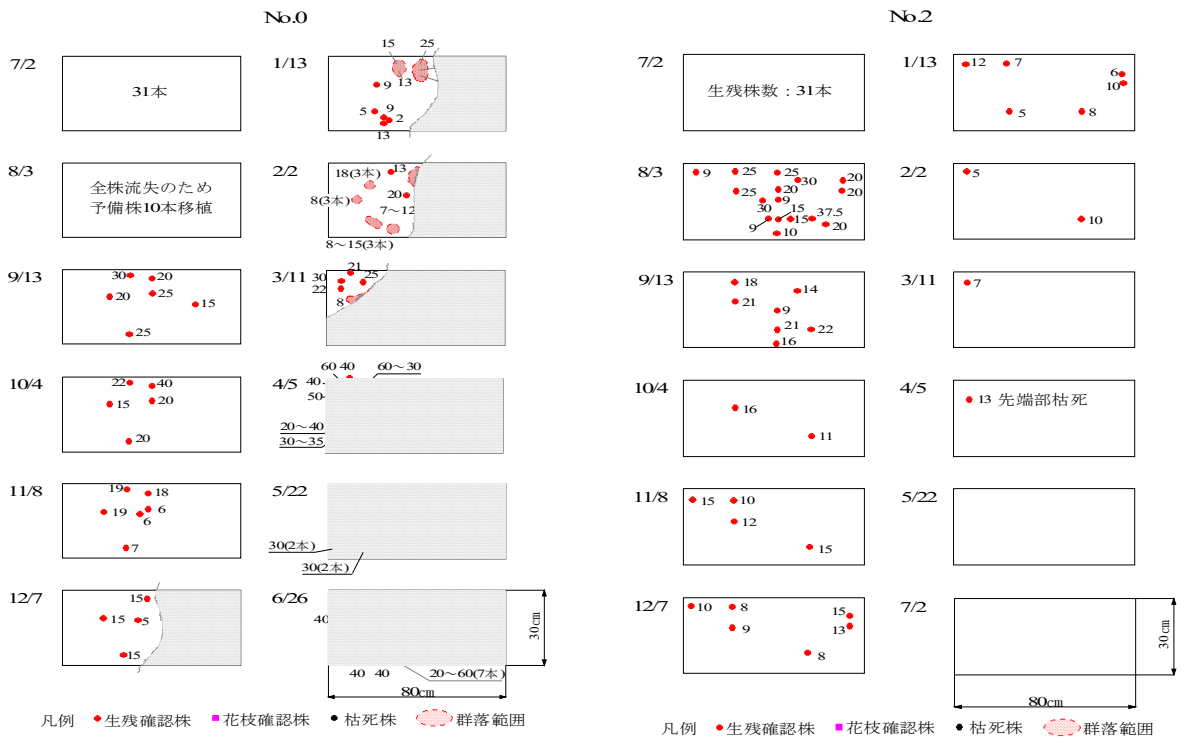
マットから全てのアマモが流失してしまったマット1基に予備の育苗アマモ10本を移植し、新たにNo. 0とした。

(2)観察結果

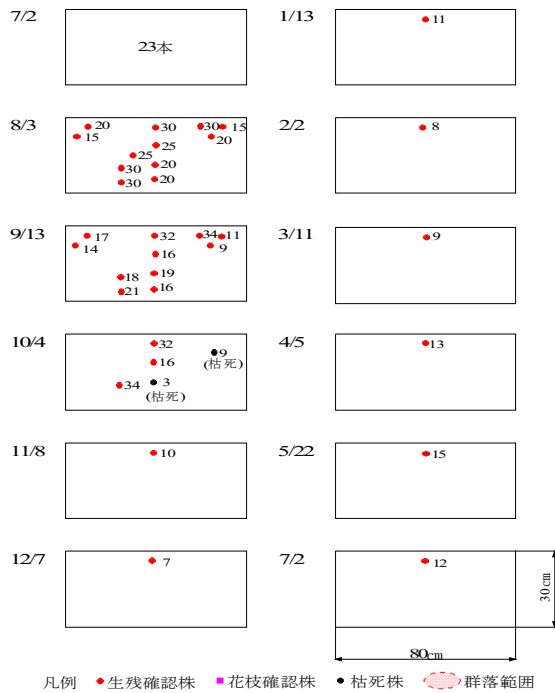
各追跡調査時に観察を行ったNo. 0、No. 2、No. 5の各マット上に生育していた移植アマモの観察記録を図II-4-4に示す。この観察記録を基に作成した、各マットの移植アマモの生残株数を図II-4-5、葉長変化状況を図II-4-6に示す。

アマモの株数は7月の海底設置後急激に減少した。しかし、水温が低下した11月以降、No. 2とNo. 0の株数は増加した。

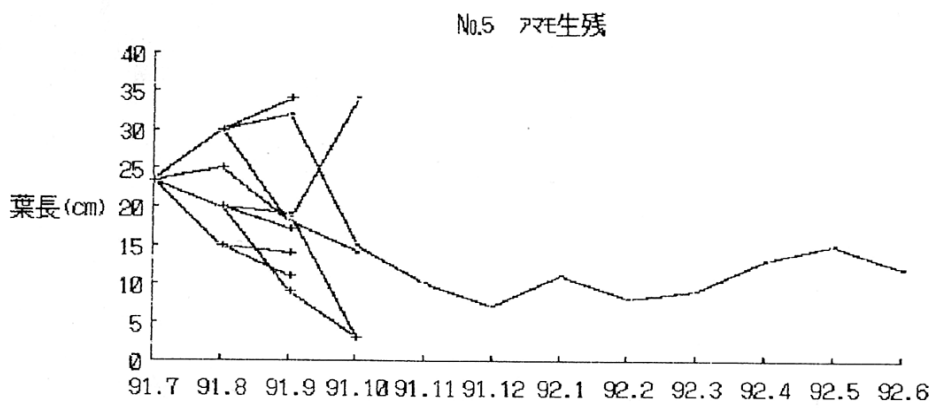
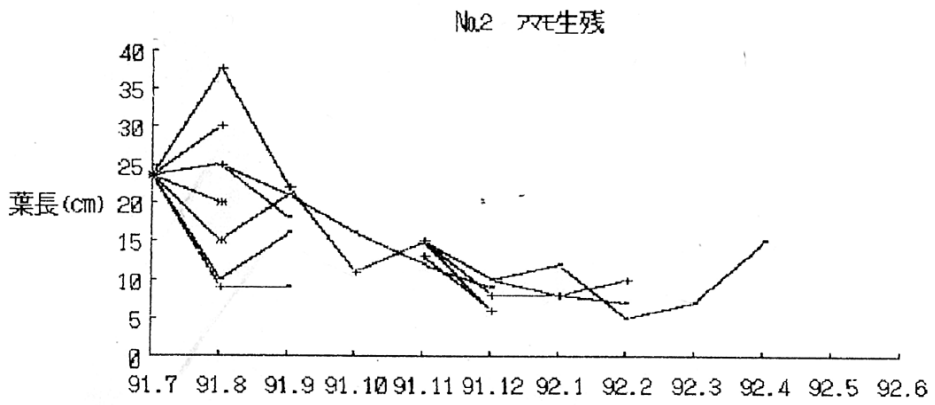
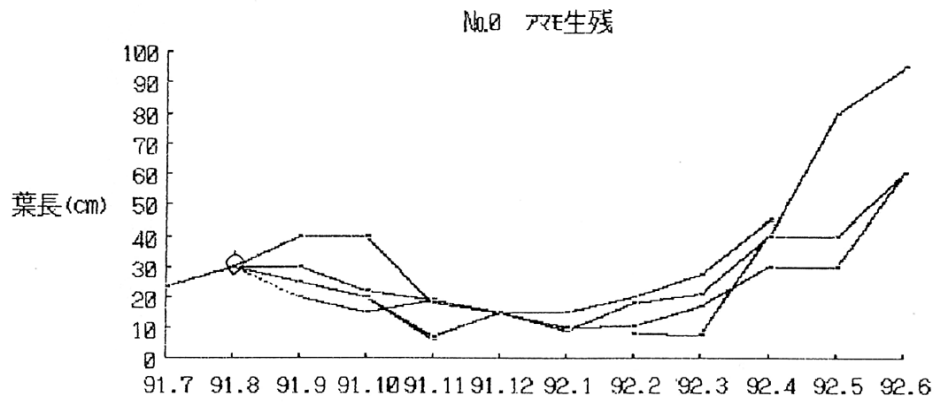
移植アマモの葉長は、周辺のアマモ場の状況と同様に11月、12月に縮小した。その後、1月になると葉長が若干延びる傾向が認められた。また、ロックウールマットは、海中において分解が進み、設置5ヶ月後の11月に指で触ると簡単に崩壊するようになった。



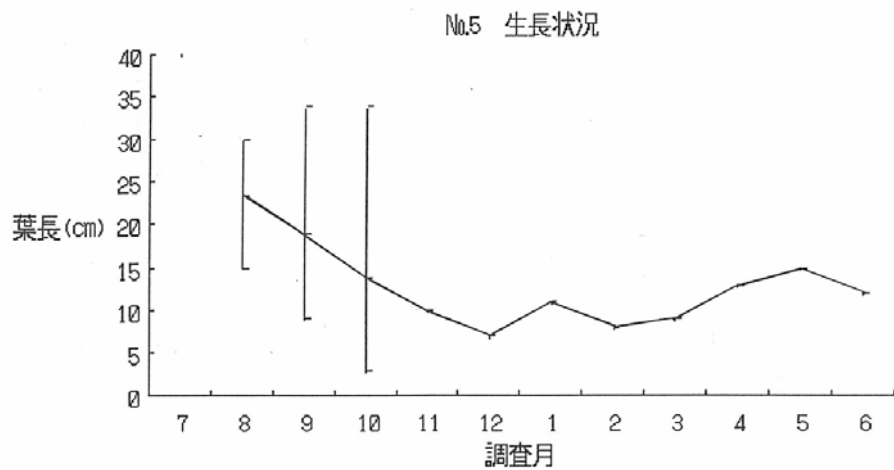
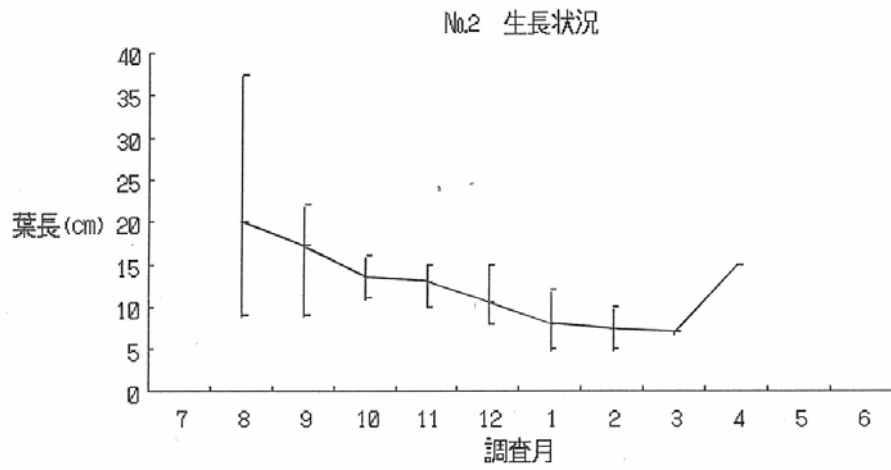
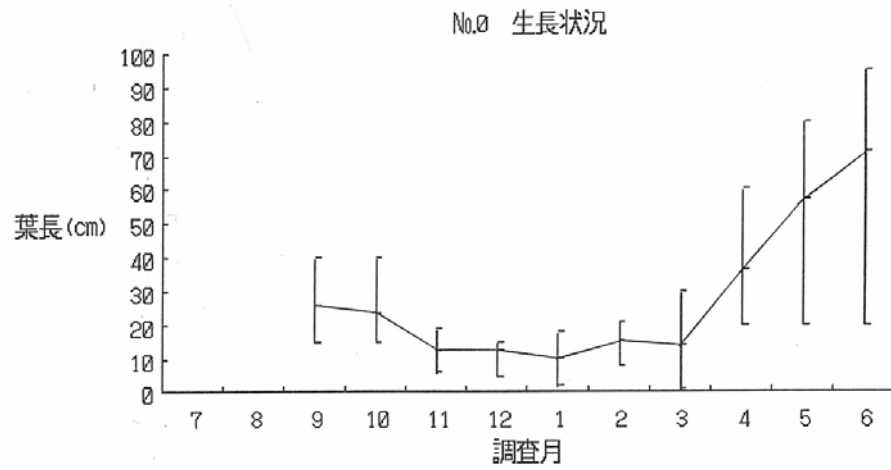
№.5



図II-4-4 海底設置アマモマットのモニタリング結果



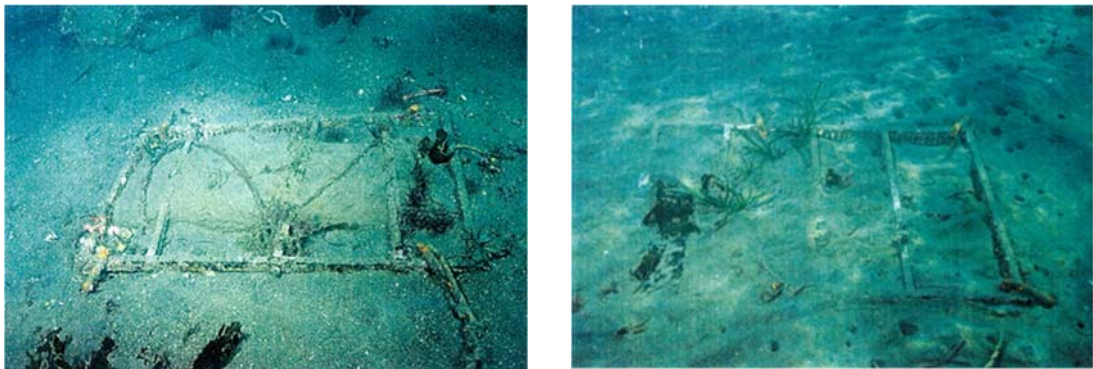
図II-4-5 生残下部別葉長変化



図II-4-6 平均葉長 (最大・最小含む)

(3) 結論

移植後、株数が増加した No. 0 では、徐々に砂が堆積し、設置後 1 年程度で全体が埋没したが、**図II-4-7** に示すようにアマモの株が埋没した部分から伸張していることが観察された。さらに、1 年後の 1992 年 5 月には移植アマモに花穂が確認され、7 月に種子形成を確認した。

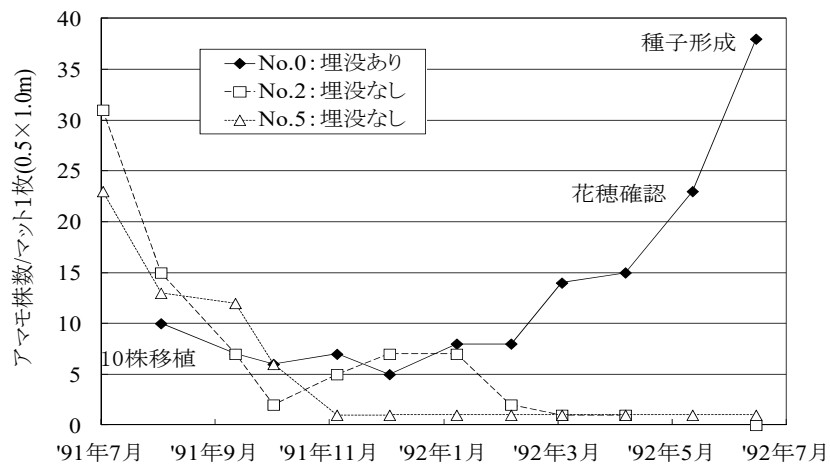


① No.2 のマット(堆積なし)

② No.0 のマット(堆積あり)

図II-4-7 アマモ移植マットの状況 (1992 年 7 月)

各苗床マットの生残株数を**図II-4-8** に示す。ロックウールマットの上に砂が堆積しなかった No. 2 および No. 5 のマットで移植株は増加しなかった。



図II-4-8 マット別アマモ生残数の変化 (田中ら 1992)

しかし、アマモが生育している部分が砂に覆われた No. 0 のマットでアマモは、成長し、花穂や種子を形成した。

このことから、アマモ地下茎の伸張には砂が堆積することが重要な条件であることが示唆された。アマモが生えている部分に砂が堆積することは、地下茎や芽の露出を防ぐ。これが、食害などからのダメージから免れることになると考えた。

このことが、地形変化シミュレーションによる底質安定性とアマモ分布を比較し、物理的条件よりアマモを始めとする海草の分布条件を評価しようとするきっかけとなった。

第Ⅲ章 アマモ場の成立条件

Ⅲ-1 海浜変形手法を用いたアマモ場成立条件

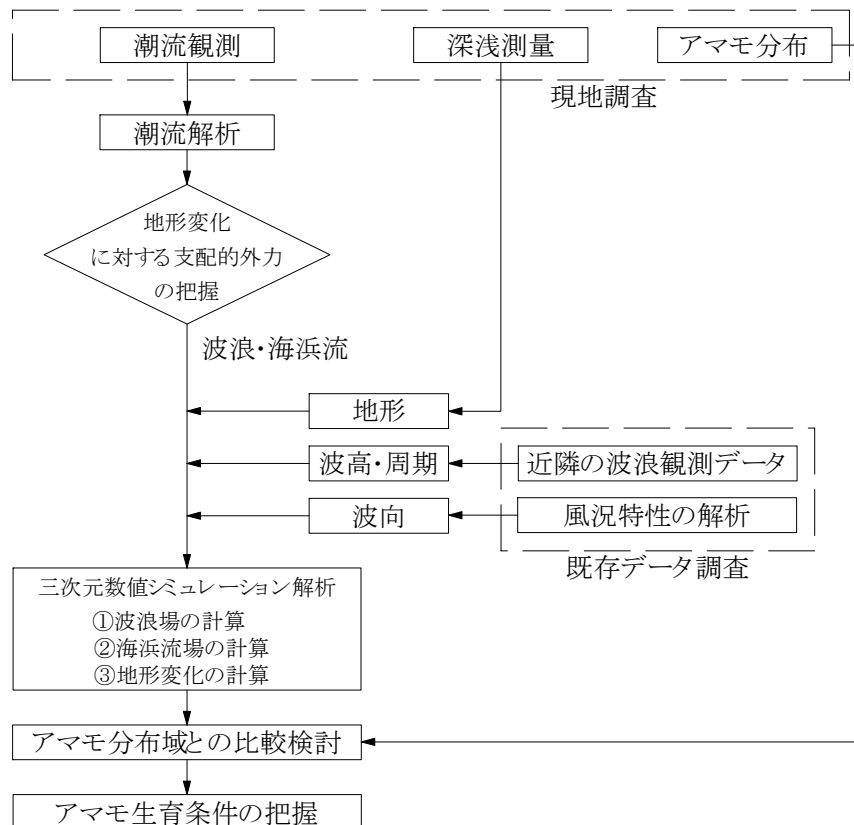
Ⅲ-1-1 はじめに

アマモ場を人工的に造成する試みは、主に育成や移植といった生物学的観点より実施されていることが多い。しかし、現実には実海域にアマモ場を造成した場合、波浪・潮流、および漂砂移動といった物理的外力条件が不相当であるため、アマモ場が維持されない場合もあると考えた。実際に水槽内でロックウールマット上に播種したアマモ苗床を千葉県富津市島戸倉地先海域に設置した実験では、アマモ苗床が漂砂により埋没した部分のみ生育が確認され、アマモの生育には底質の移動や浸食・堆積が重要な要素であることが示唆された。これらの浸食や堆積は、海岸付近の波浪や潮流によってもたらされるものである。

アマモ場造成を行う場合、平面的にどこまでの範囲がアマモ場となり得るかを把握することが重要である。また、ここで把握されたアマモ場の成立条件は、アマモ場を人工的に造成しようとする場合の外力制御目標となる。

アマモ場の成立に関わる物理的条件、特に波浪や砂の移動の条件を明らかにした調査研究例は少なく、アマモ場分布の岸側の限界がシールズ数、沖側の分布限界が照度によって規定されるという報告がみられる程度である（丸山ら 1987, 川崎ら 1991）。しかし、これらの研究は、アマモ場の平面的な広がりについてまで検討されていない。

そこで、現存するアマモ場について、アマモ分布、底質分布および流況に関する調査、および波浪や砂の移動に状況の平面分布を再現する数値計算により同一範囲を対象として行なうことを試みた。さらに、それぞれの分布状況を直接比較



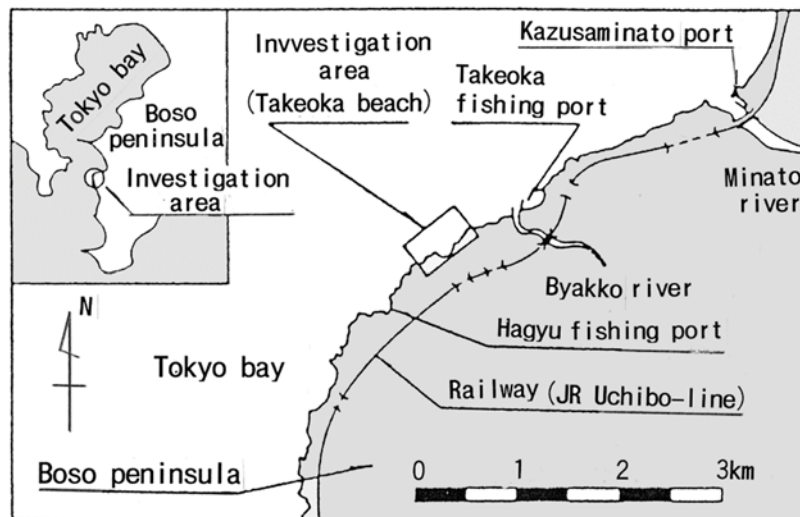
図III-1-1 アマモ場の物理的条件把握の流れ

することにより、アマモの存在範囲を物理的外力条件より把握することを試みた。具体的方法は、図III-1-1 に示すようにアマモ分布や波浪潮流の現地観測と現地調査結果および既存の情報を用いた波・流れ・底質安定性などの物理条件の平面分布再現計算を同時に行い、両者の結果を比較検討した。

なお、同一の座標を用いて各種の条件を重ね合わせ、その座標の属性や条件などを抽出する方法は、今日、G.I.S.として一般的に用いられているものである。しかし、この研究を行った当時、海域を対象とする検討事例はなかった。

III-1-2 調査方法

1. 調査地点の概要



図III-1-2 竹岡海岸（津浜海水浴場）位置図



図III-1-3 竹岡海岸（津浜海水浴場）の景観

アマモ分布を波・流れ・底質安定性など物理的外力条件より評価するために、アマモが分布している海域において、アマモや底質の分布状況調査ならびに波・流れ・底質安定性の数値シミュレーションを用いた再現計算を行った。

調査対象としたアマモ場を含む海域は、図II-2-1 に示した千葉県富津市の竹岡

漁港～金谷港にわたる範囲でアマモ群落が確認された竹岡津浜海水浴場（通称：竹岡海岸）、富津市島戸倉地区 1（通称：相沢下）、富津市島戸倉地区 2（通称：石井造船所下）のうち、最大のアマモ場面積を有する竹岡津浜海水浴場（通称：竹岡海岸）とした。竹岡海岸の位置を図Ⅲ-1-2、沖側より見た状況を図Ⅲ-1-3 に示す。この竹岡海岸のアマモ群落分布状況および底質や波浪・潮流の測定ならびに物理的外力分布の再現計算を行い、これらの結果を相互に比較することにより、アマモ場に作用する外力を評価してアマモ場の分布に関わる外力条件を定量的に把握することを試みた。

竹岡津浜海水浴場（通称：竹岡海岸）は、海岸の幅 50m×延長 200m 程度のポケットビーチであり、その沖側水深 T.P.-4.0m 付近を中心にアマモ (*Zostera marina*) を主な構成種とするアマモ場が形成されている。また、アマモ場の沖側部分には通称「大アマモ」(タチアマモ *Zosutera caurescence*) が分布している。当該地点のアマモ場は、夏季の 6 月～7 月に最も繁茂する時期であり、それ以降、急激に減少し、11 月～12 月の発芽期にアマモ群落が確認できる面積が最も縮小する最衰退期であることが漁業者よりのヒアリングおよび事前の現地踏査により把握されていた。

2. 調査メッシュの設定

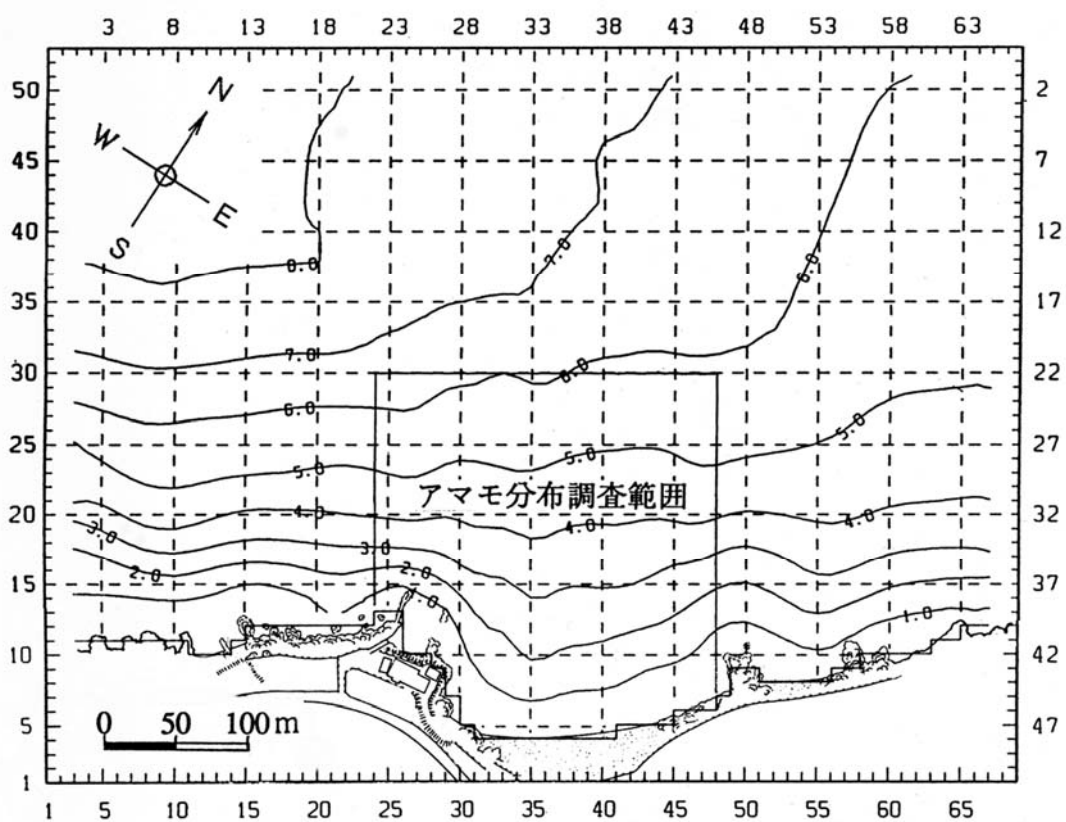
竹岡海岸を中心とする図Ⅲ-1-4 に示す調査海域に図Ⅲ-1-5 に示す数値計算の計算領域を設定した。このメッシュを利用してアマモ分布調査、底質調査、波浪・流況測定を行ない、さらに波・流れ、底質移動に関する数値計算を行った。計算領域は、沿岸方向 640m、岸沖方向 480m を包括するように設定し、計算メッシュ間隔は 20m×20m とした。また、計算領域内のアマモ分布調査範囲は、計算メッシュ間隔を 10m×10m とした。

アマモ分布調査範囲の計算メッシュは、図Ⅲ-1-6 に示すようにアマモ分布調査

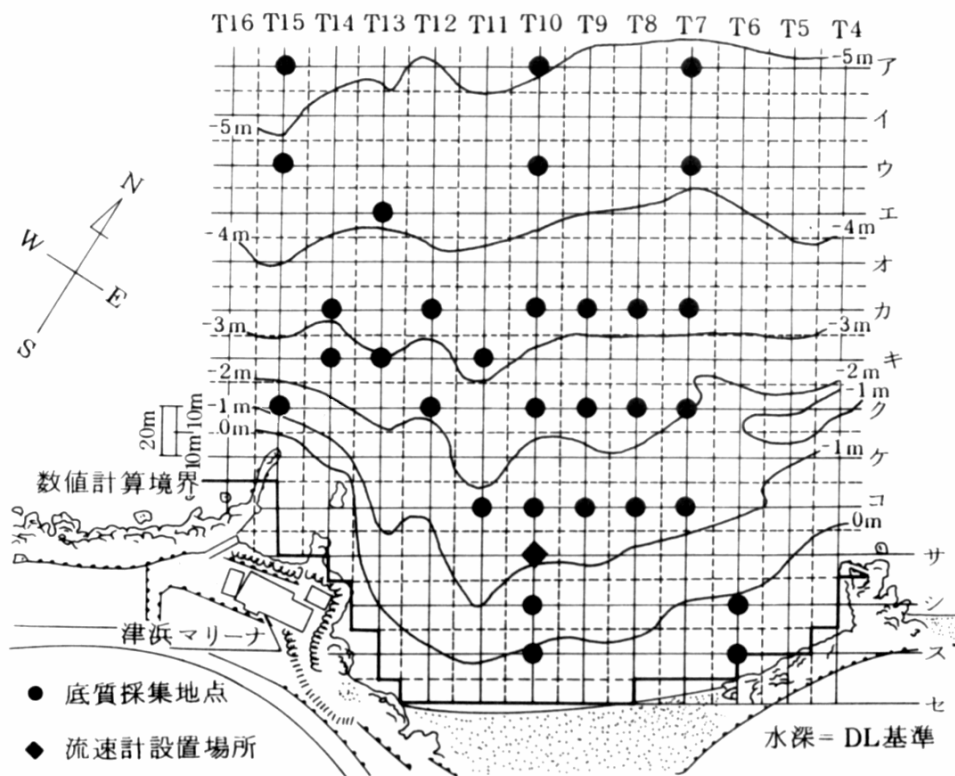


海洋情報表示システム「海しる」 <https://www.msil.go.jp/msil/htm/topwindow.html> より

図III-1-4 調査範囲



図III-1-5 竹岡海岸調査メッシュ



図III-1-6 竹岡海岸アマモ・底質調査メッシュ（本図のみ水深は潮位表基準面基準）

や底質調査のメッシュを兼ねている。以降の検討において、数値計算による外力分布メッシュ、アマモ分布メッシュ、水深メッシュ、底質状況メッシュをそれぞれ重ね合わせてアマモ分布の条件を抽出することにした。

3. 海底地形調査

アマモ場分布を評価する場合、アマモの正確な分布位置を把握することは勿論、アマモの分布水深、海底地形形状、岩礁の分布および底質の状況を同時に把握する必要がある。また、地形や底質の状況に関する情報は、物理的外力条件の数値計算を行う上でも必要である。この中で最も基本的な情報は、水深情報である。なお、この章での水深は東京湾中等水位（T.P.）を基準とした。

調査範囲の海底地形は、東京湾口部の海図 W1062（INT5304）を基本とした。しかし、汀線付近は水深の詳細が明らかにならなかったため、1989年11月

に音響探知式測深機による水深や海底地形状況を計測した。計測に当たっては、調査範囲にメッシュに合わせて 20m ピッチで基点を測量により設け、船舶を陸上に設置したレベルにて汀線から沖側垂直方向に誘導して水深を測定した。この時に設けた基点は、アマモ分布調査と底質採取にも位置を確認するために用いた。

4. アマモ分布調査

アマモ群落の分布を把握しようとするには、現在であればマルチビームソナーによる音響探知スキュニングを用いる方法（奥村ら 2006）やリモートセンシングによる方法（岸本・有田 2018）などがある。調査を行った当時、その技術は実用化されていなかった。そこで、アマモ分布状況は潜水士が目視観察した。

アマモの分布状況を潜水士が観察する場合、東京湾のように水中における視程が不良な場所には、広範囲の群落分布を把握することが困難である。そこで、**図 III-1-7**に示す要領で調査範囲内に 20m 間隔に目印をつけた測線ロープを測量により求めた陸上の基点より海中に展開し、測線ロープから汀線直角方向に設定した測線に対して 45°、135°、225°、315°の 4 方向に各 7m の測定補助ロープを伸長

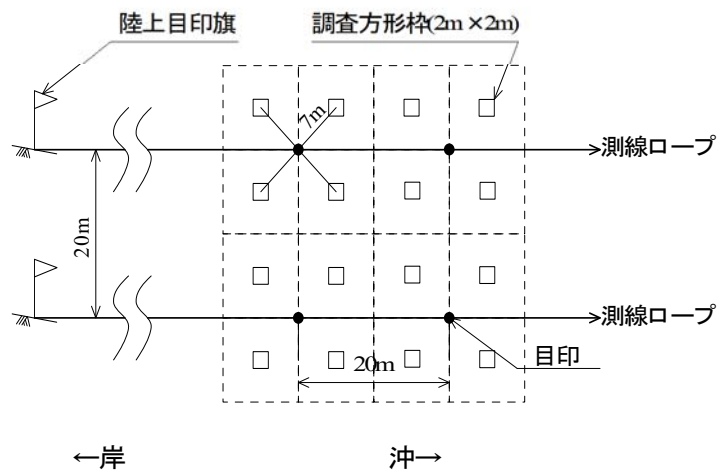
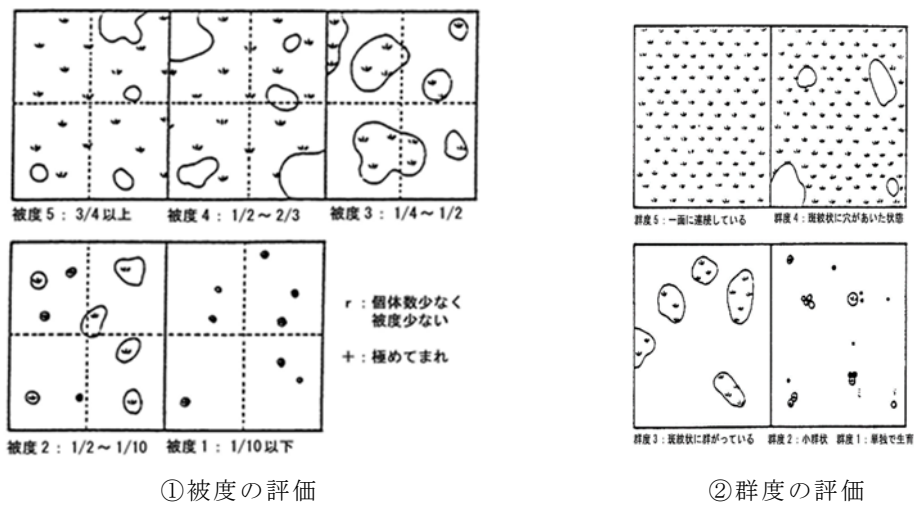


図 III-1-7 アマモ分布状況調査要領



図III-1-8 ブロンブロンケ法による被度と群度の評価（中西ら 1983）

し、ロープ端点に2m×2mの方形枠を配置した。この枠内のアマモ群落状況を観察し、方形枠内のアマモ群落の状況を各10m×10mの調査メッシュの状況とした。また、当該海域にはアマモとタチアマモが分布していたので、両者を識別して上記の観察を行った。

各メッシュ内のアマモ群落の状況は、図III-1-8に示すブロンブロンケの全数推定法（中西ら 1983）による2m×2m当りの被度および群度を評価した。

草丈の測定については、全範囲にわたってコドラート内の草丈を計測することが調査期間の制約から困難であったので、各メッシュ内に分布するアマモ群落について目視により平均草丈長を記録した。なお、目測による群落平均草丈長測定の有効性を担保するために、複数の調査地点にてアマモ群落に1m×1mのコドラートを配置して、枠内に出現した全てのアマモ株の草丈を計測し、そのメッシュで測定したアマモ群落代表草丈と比較した。

5. 底質調査

アマモ群落観察時に図III-1-6に示す調査範囲のうち底質サンプリング地点にて

潜水土が底質表層部分約 10cm を採取した。採取した底質サンプルは、粒度組成と強熱減量の分析を行った。それぞれの項目の分析方法は以下に準拠している。

- ・ 粒度組成：JIS A-1204：標準ふるいによる篩い分けおよび比重計使用による沈殿法

- ・ 強熱減量：JIS A-1226：乾泥を $600^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ で強熱し重量法により算出

底質安定性などの物理的外力条件は、数値計算により平面的に計算される。また、アマモの分布も平面的に評価している。しかしながら、底質に関する情報は離散的であり、平面的評価が困難であった。そこで、底質分布にかかわる情報は各データ測定地点間の情報を内挿計算して、平面的な情報に変換した。

6. 水質調査

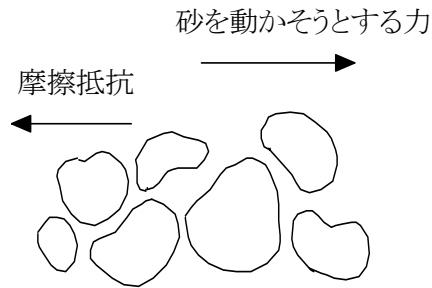
本研究では、特段、水質の測定を行っていない。これは、流入河川がない 400m 程度四方の範囲でアマモ場分布に影響を与えるほどの水質変化が想定されないと判断したことによるものである。

III-1-3 数値計算

1. 数値計算活用の経緯

アマモ株はそれ自体に浮力を持っており、地下茎を付けたまま浮游しているアマモ株を見かけることが多い。この浮力をもつ株が海底に根付くためには、海底の土砂が安定している必要がある。さらに、葉の表面に浮泥が堆積して光合成を阻害しないようにするためには、適度な海水の擾乱があることが望ましい。

海底の土砂を移動させる要因は、波や流れといった物理的要因である。これら波や流れによる土砂の移動メカニズムについて検討した研究は、海岸工学や河川工学の分野で数多くあり、既に波や流れによる水底の土砂の移動メカニズムに関して公式集や教科書に記載されている。



図III-1-9 シールズ数の概念

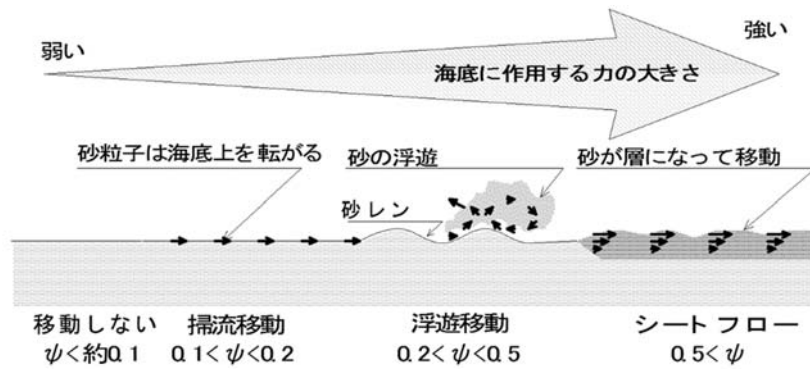
本研究では、波高や流速の他にシールズ数と地形変化量を用いてアマモ分布と比較した。このうち、特にシールズ数（ ϕ ）がアマモ分布に適していると考えた。シールズ数（ ϕ ）は、図III-1-9に示すように水底の土砂粒子にかかる底面せん断力と土砂粒子が動かされまいとする抵抗力の比である。また、III-1)式によって算出される。シールズ数計算に必要なパラメータには、底質の条件と底面せん断力という外力の条件が入っている。このように、底質の要素と波浪などによる底質を動かす要素が1つのパラメータで表現している。

$$\frac{\text{砂を動かそうとする力}}{\text{摩擦抵抗}} = \frac{1}{2} \frac{\rho_w f u_w^2}{(\rho_s - \rho_w) g d} = \phi \quad \dots\dots \text{III-1)}$$

ただし、 g ：重力加速度、 ρ_w ：海水の密度、 ρ_s ：底質の密度、 d ：底質粒径、 u_w ：軌道流速振幅(波による水粒子の軌道運動速度の底面境界層外縁での最大値、 f ：摩擦係数とした。

シールズ数は、Shibayama and Horikawa (1982)が示したようにその数値によって底質を構成する粒子の移動形態を以下の3形態に表現できる。

- ・ 掃流状態：粒子が底質上を転がって移動
- ・ 浮遊移動：粒子が波浪や流れにより底質上に舞い上がって移動
- ・ シートフロー：粒子が層状になって移動



図III-1-10 シールズ数による底質移動の評価
 [Shibayama and Horikawa (1982)に準拠して作成]

この移動形態の分類は漂砂分野では一般的に用いられており、図III-1-10 にアマモの分布を比較する。なお、底質の移動状態は、外力条件の変化により徐々に変化するものであるため、シールズ数が表す数値が厳密にその数値になると底質の移動状態が変化するのではない。

面的に広がるアマモ場について、その分布範囲のシールズ数を評価しようとするならば、検討範囲全体の包括する範囲における波高分布や海浜流分布を明らかにしなくてはならない。これを現地計測によって明らかにしようとするならば、膨大な計測器と労力が必要となる。このような場合、比較的小規模な現地計測結果を用いて広い範囲の平面的な外力の概略的分布を知ることのできる数値シミュレーションが適していると考えた。このため、アマモ分布条件の検討に数値シミュレーションによる物理的パラメータの再現計算結果を用いることにした。

なお、シールズ数の評価は、沿岸域において港湾や人工海浜の漂砂を検討するために用いられることが多い。港湾にあつては、港湾の維持浚渫計画を検討する際、港湾内にどの程度の堆砂が予測されるかを明確にする必要がある。また、海岸にあつては砂浜の前進や後退を予測する必要がある。このような港内堆砂や海浜変形は、古くから海岸工学の重要な研究課題であった。従来、海域において汀線や海底地形の変化を引き起こすような外力および地形変化特性については、

長期間にわたる測量や蛍光砂の移動観察のように調査方法が難しく長期間にわたる観測を行わなくてはならなかった。

これらのことを予測する目的で数値計算シミュレーションによる海浜変形予測モデルが開発されるようになった。海浜変形予測モデルは、海浜の比較的長期的な汀線変化を予測する「汀線変化モデル」と代表的な波浪が作用するなどの比較的短期的な現象下での地形変化を予測する「三次元海浜変形モデル」に大別されている。汀線変化モデルは平面的な浸食・堆積位置を予測することが出来ない。一方、三次元海浜変形モデルは、計算領域の波浪、波浪による流れである海浜流を計算し、その結果得られた水理量を用いて局所的漂砂量を評価し、地形変化を予測する方法である。しかしながら、三次元海浜変形モデルは、極めて複雑な計算を行っているので、電子計算機の能力が発達して、かつ容易に使用できるようになるまで実施が困難であった。

汀線変化モデルは、沿岸漂砂の土砂収支より海岸線の変化のみを取り扱うものであり、1980年代前半までに普及していた。一方、1980年代初めより漂砂を引き起こす物理的な力（外力）である波浪・海浜流場の計算結果に基づき、局所漂砂量の空間的な収支から平面的な地形変化を計算する三次元海浜変形モデルに関する研究が行われてきた。そして、現地への適用を通して三次元海浜変形モデルの改良が図られてきた。さらに、縦断地形変化についても、造波水路による底質移動の実験結果および現地観測データの蓄積により地形変化のメカニズムがより明確化してきた。この結果、波による岸沖方向の砂移動、戻り流れによる沖向きの砂移動のメカニズムを加え、現地観測結果や水槽実験の結果に比較してかなり精度良く現象を再現されるようになった。この計算プロセスの中でシールズ数が計算される。

外力分布を求めるためには、主に底質の移動に対して関与する外力条件を評価

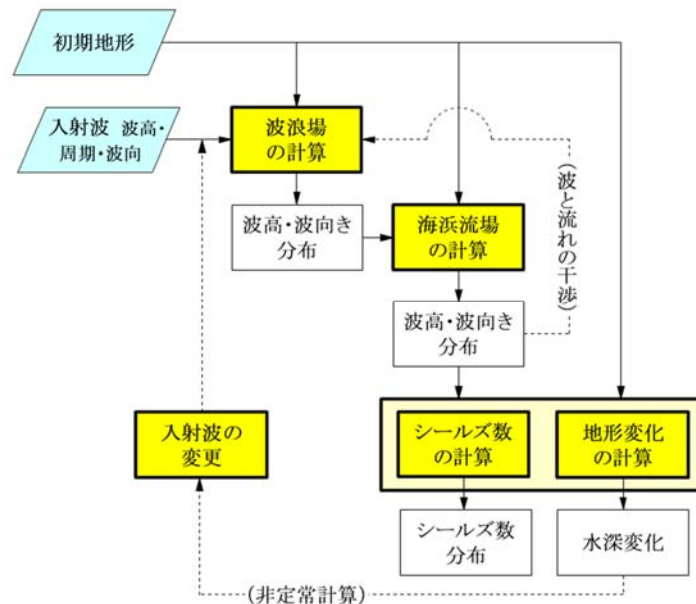
する必要がある。そこで、現地の海水流動状況を実測し、底質の移動に影響する外力条件の数値計算の参考とした。

2. 三次元海浜変形モデルの概要

三次元海浜変形モデルは、港湾の漂砂状況や浸食堆積傾向を評価するために開発され、清水ら(1989, 1990)により既に現地での適用性が確認されている。なお、三次元海浜変形モデルの「三次元」とは、空間を表す (x、y、z) を示すのではなく、①波浪場の計算、②海浜流場の計算、③地形変化の計算という3つのサブモデルにより全体の計算が構成されていることを示している。

三次元海浜変形モデルの計算フローは、図III-1-11 に示すように①波浪場の計算、②海浜流場の計算、③地形変化の計算の3つのサブモデルが互いに関連しあって計算している。

①波浪場の計算：最初に行われる計算である。まず、計算対象領域の波浪と海浜流の平面分布を計算し、その結果得られた各地点での水理量を用いて地



図III-1-11 三次元海浜変形モデルの計算フロー

形変化を予測する。計算条件より設定した波浪が計算領域に作用する場合、計算領域に於ける波高と波向きを計算する。

②海浜流場の計算：海岸に波浪が作用する場合、波によって水塊も移動する。

このときに発生する海浜流の流向・流速の分布を数値計算により導き出す。

③地形変化の計算：海浜流が海底に作用するとき、底質粒子にせん断力（底面せん断力）が作用し、この力により底質粒子が移動する。この移動の結果が堆積傾向であれば水深が浅くなり、浸食傾向であれば水深が深くなる。この状況を数値計算により再現計算する。また、ここで算出された水深は、①の波浪場の計算にフィードバックされる。

これらのサブモデルの計算手法の概略を表III-1-1、数値計算の実施諸元を表III-1-2に示す。

現実の海域にあっては、波浪・海浜流・地形変化は、相互に干渉しあって刻々と変化していく。波浪により海浜流が発生すると、これによる底面剪断力が地形を変化させる。すると、波高の分布状況が変化し、これに応じて海浜流が変

表III-1-1 三次元海浜変形モデルの概略計算方法

項目	手法
①波浪場の計算	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎式 : 波のエネルギー平衡方程式 Karlsson(1969)による浅水変形・屈折の評価 ・回折の考慮: 方向分散法 ・碎波の考慮: 合田(1975)の不規則波の碎波変形モデルの簡略式
②海浜流場の計算	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎式 : 水平面内の平均流に関する連続式ならびに運動方程式 ・計算法 : 時間項・移流項・圧力項・底面摩擦項・水平拡散項・外力項(波のラジエーションストレス radiation stressによる項)を考慮した非定常計算法
③地形変化の計算 シールズ数の 計算を含む	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎式 : 漂砂の連続式 ・局所漂砂量公式: 渡辺ら(1984)の評価式 (漂砂量=パワーモデル, 移動方向=平均流の方向に一致) ・底面せん断力の評価: 田中・首藤(1980)の表示, 田中・Sana(1996)の表示 ここで導き出された水深は、①の波浪場の計算にフィードバックされる。

表III-1-2 数値計算の実施緒元

解析項目	項目	計算条件
初期条件	計算領域	沿岸方向：640m 岸沖方向：480m
	計算格子間隔	10m×10m
	使用水深	T.P.換算
波浪場の計算	周波数分割	10分割
	角度分割	4°分割
	側方境界条件	内外同一スペクトル
	対象方向スペクトル	Bretschneider-簡易型周波数、スペクトルと簡易型方向分布関数の組み合わせ
	波向方向	主波向
	計算波高	$H_{rms}=H_{1/3}/1.416$
海浜流場の計算	流れに対する摩擦係数	30(シェジャーの流量係数)
	波に対する摩擦係数	0.01
	水平混合計数	Longuet-Higginsの渦動粘性係数表示において $N=0.01$ (汀線までの最短距離)
	計算時間間隔	0.28 s
	沖合境界条件	開境界
	側方境界条件	開境界
	壁面境界条件	non slip
	計算打ち切り時間	1000s
地形変化の計算	計算波高	$H_{1/3}$
	底質代表粒径	0.2mm
	底質代表比重	2.65g/cm^3
	波による漂砂量係数	$A_w=0$
	流れによる漂砂量係数	$A_c=1.0$
	水深変化量	1日あたりに換算

化する。このことが繰り返されている。このため、計算に当たっても、これらの波浪・海浜流・地形変化の3要素は0.28秒という短い時間間隔で反復計算を行なっている。即ち、計算のプロセスで算出された結果が別の条件に影響を与えることになるので、条件を与えて計算を開始し定常状態になるまで計算を繰り返すことになる。このように計算ステップが増加すれば、計算時間が膨大なものとなる。このため、三次元海浜変形モデルはコンピューターの計算速度が速くなったために、ようやく実用化した方法であるといえる。

三次元海浜変形モデルには、港湾などの構造物近傍や港湾内の地形変化、および土砂堆積による航路埋没を予測することを目的とした長期予測モデルと1回の高波浪に生じる地形変化を予測する短期予測モデルがある。

アマモ群落の存在は、アマモ群落が台風などの高波浪イベントが発生したときに消滅すると考えられる。そこで、今回は短期予測モデルを用いた。

3. 計算実施上の妥協点

数値計算の実施に当たっては、竹岡海岸の地形変化予測を行った 1990 年に底面せん断力の算定のために田中・首藤(1980)の表示に基づき陰解法（繰り返し計算法）を用いた。このため計算機に大きな負担をかけており、1 ケースの計算時間は約 3 時間以上必要であった。そこで、この計算においても、計算時間の短縮を目的として以下の計算条件簡略化を行った。

①水深方向の流速分布

実施の海域においては、底面付近は海底との摩擦が生じるため表層に比較して流速が低下している。しかし、本計算では海面から海底面まで同じ流速が分布することにした。

②底質分布

調査範囲内の底質は決して均一でない。しかし、初期条件に現状の底質条件を反映させると膨大なデータのインプットが必要であり、かつ計算にも非常に時間がかかる。そこで、地形変化の計算に当たっては、検討範囲内がすべて同一の底質で構成されていると仮定した。

計算領域内には岩礁が砂泥海底に露頭している部分が見られたが、計算に当たって海底が全て均一な底質であるとした。これは、事前調査により岩礁の露頭が 1 つ 1 つの規模が小さく、かつ点在しているため調査範囲の湾内の海水流動に大きく影響を及ぼすことがないと判断したためである。

4. 数値シミュレーション入力条件設定

数値シミュレーションを行うには、海底地形図・底質条件、および計算に用いる波向きと波高の決定が必要である。海底地形図や底質は現地調査によって明ら

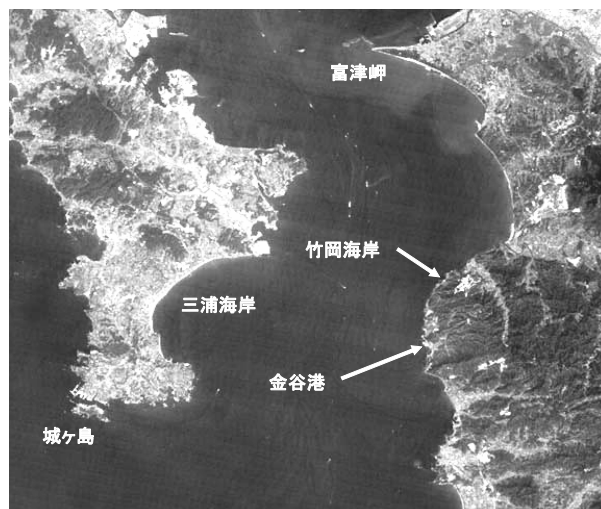
かになっている。また、計算に用いる波向き、波高は、近隣で波浪や風況を観測しているデータより設定した。

(1)波浪条件

波浪条件について、現地調査の観測結果により竹岡海岸におけるアマモ場周辺の地形変化を引き起こす外力条件としては、潮流の影響が小さいものと考えられた。そこで、アマモ場分布可否に影響を与える条件として高波浪時の波および海浜流の作用を評価することにした。これらの外力評価を参考に高波浪時の短期的な地形変化の再現が可能である地形変化予測の短期予測モデルを用いてアマモ場周辺の外力分布を評価することにした。

調査地点近隣の波浪観測地点である図III-1-12 に示す千葉県浜金谷港の波浪特性を参考に数値シミュレーションに用いた。浜金谷港は、調査地点である竹岡海岸より東京湾口部へ約 4,000m の場所に位置している港湾であり、対岸の神奈川県久里浜港との間に東京湾横断フェリーボートの航路がある。

浜金谷港と竹岡海岸は、距離も近く、沖合に島などの遮蔽物もないことから、



図III-1-12 調査地点と波高調査港湾（浜金谷港）の位置関係

表III-1-3 浜金谷港での月別平均および最大有義波高（小舟ら 1990）

項目		月												年間
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
最大有義波	H _{1/3} (m)	2.75	2.75	2.14	2.47	2.52	1.05	1.69	2.99	2.11	1.61	2.42	1.96	2.99
	T _{1/3} (s)	6.7	6.7	5.8	5.9	6.1	4.6	5.1	9.8	10.3	5.1	6.4	5.8	9.8
最高波	起時 (日・時)	20-14	24-8	31-16	27-22	14-14	6-18	12-6	27-20	20-8	17-2	29-16	4-16	8-27-20
	H _{max} (m)	5.58	5.58	3.16	3.19	3.67	1.80	2.41	3.99	3.43	2.63	3.19	2.73	3.99
最高波	T _{max} (s)	6.2	6.2	5.8	5.4	5.5	4.4	5.0	8.4	9.3	4.7	6.6	5.6	8.4
	H _{1/3} (m)	0.16	0.16	0.23	0.21	0.20	0.17	0.20	0.18	0.22	0.20	0.20	0.20	0.16
最小有義波	T _{1/3} (s)	6.4	6.4	7.0	4.8	4.5	4.8	4.2	5.0	5.3	4.0	4.3	5.4	6.4
	起時 (日・時)	1-2	4-22	4-2	8-0	19-22	23-2	25-4	25-4	18-2	21-4	3-2	2-2	1-1-2
平均有義波	H _{1/3} 平均値	0.60	0.56	0.55	0.63	0.52	0.42	0.43	0.53	0.56	0.48	0.55	0.49	0.53
	(m) 標準偏差	0.415	0.385	0.320	0.426	0.307	0.175	0.235	0.407	0.299	0.225	0.347	0.275	0.332
標準偏差	T _{1/3} 平均値	4.6	4.5	4.8	4.9	4.7	4.5	5.3	5.0	4.9	5.6	4.8	4.6	4.8
	(s) 標準偏差	1.149	1.180	1.235	1.217	1.098	1.181	1.644	1.488	1.496	2.376	1.001	1.112	1.435
測 得 率 (%)		100.00	100.00	95.70	99.72	98.66	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.17	100.00	99.43

ほぼ同様な波浪が作用すると考えた。そこで、波浪条件は、小舟ら(1990)による竹岡海岸近傍の浜金谷港における 1988 年の波浪観測データより決定した。

計算に用いた波高は、既存計測結果を参考にした。本研究では、現存するアマモの分布とその場に作用する可能性のある外力条件を比較することを試みた。年間平均有義波高程度の通常波浪の状態ではアマモ群落が維持されていると考えられることから、数値計算に用いる波浪条件についてはアマモにとって平均有義波高よりもやや厳しくなる程度とした。このことより、解析に用いる高波浪時の代表波は、小舟ら(1990)による調査地点近傍港湾である浜金谷港の 1991 年における最大有義波高 3.49m、年間平均有義波高 0.59m を参考に年間平均有義波高より大きい H_{1/3}=1.0m を中心として設定した。この時の有義周期は、小舟ら(1990)による浜金谷港の波高周期度数分布表より T_{1/3}=4s とした。

この条件は、表III-1-3 より未超過出現率約 90%である。未超過出現確率の意味は、年間にこの波浪条件を上回る波浪が来襲する確率が 10%、即ち 36.1 日/年

(365日×0.1=36.1日)に発生し得る波浪である。単純計算すれば、毎月1回程度発生する通常の荒天時における波浪条件であるが、実際には毎月必ず発生するわけではなく、低気圧や台風が作用する季節に集中的に発生する。

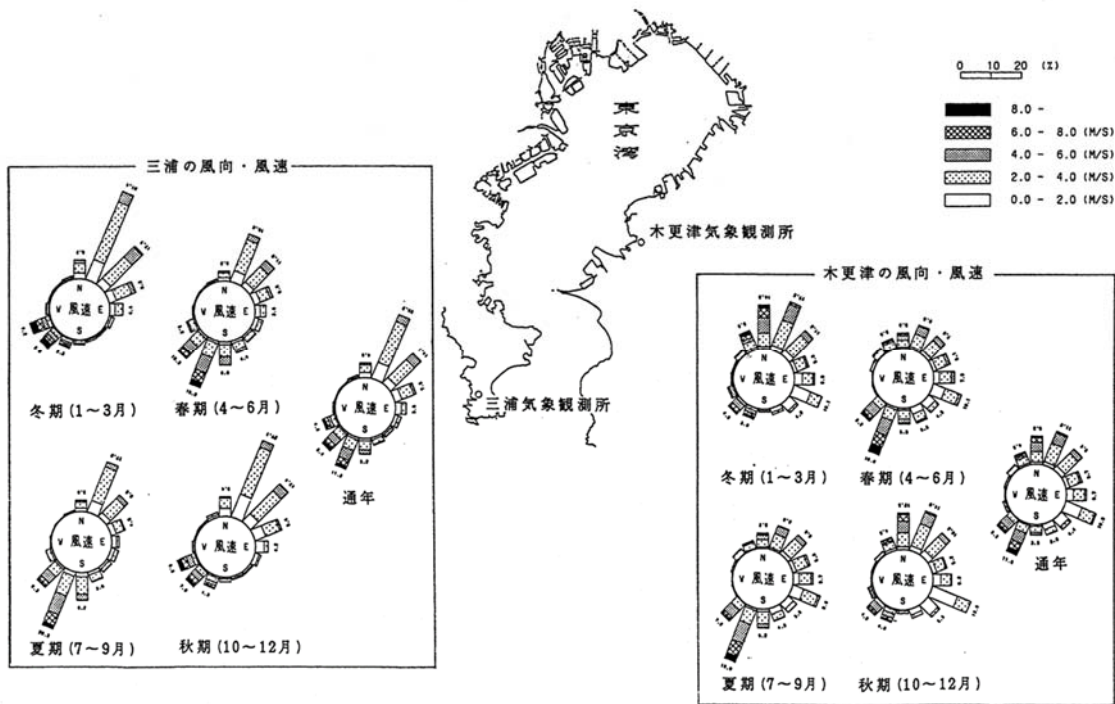
計算は有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=4\text{s}$ のケースだけではなく、以下に示す条件についても実施した。

- ・ $H_{1/3}=3.0\text{m}$ $T_{1/3}=7\text{s}$: 数年に1回生じる程度の高波浪
- ・ $H_{1/3}=2.0\text{m}$ $T_{1/3}=6\text{s}$: 年に1回程度生じる高波浪
- ・ $H_{1/3}=1.0\text{m}$ $T_{1/3}=4\text{s}$: 未超過確率 90% (月に1~2回程度発生)
- ・ $H_{1/3}=0.6\text{m}$ $T_{1/3}=3\text{s}$: 年間平均有義波高

計算に用いる波向きについては、浜金谷港では波向の観測がなされていなかったために風向きより推定した。後述する現地での波高・潮流調査より、当該地点の波浪は、潮流成分が小さかったことより、風波が卓越することが明らかであったので、風向と波向きが殆ど一致するものと考えて良い。このような場所では、風向から波向きを推定することが妥当である。また、調査対象地点は直接外洋に面しているわけではないので、太平洋方向からのうねりの作用は考慮しなくても良いと考えた。

以上のことより、調査地点周辺地区の三浦および木更津の気象観測所における1985年1月1日~1989年12月31日までの地域気象観測資料(アメダス)による風況データを整理して当該海岸に作用する波向きを推測した。

図III-1-13に示す5年間の風況測定結果を整理した図を見ると三浦、木更津両測候所とも当該地点では、風速8.0m/s以上の強風がSW方向より吹くことが明らかである。沖合でSWの強風を受けて発生・発達した波浪は、東京湾奥部(NNE)に向かって進行し、竹岡海岸などアマモが分布場所沖の浅海域で屈折・回折して海岸に入射する。そのため、竹岡海岸付近においては、高波浪時の波がアマモ場



図III-1-13 1985年1月1日～1989年12月31日の風速風向分布

の汀線直角方向に対してほぼ垂直、あるいはやや南から入射することが多いと考えられる。このことから、検討対象区域に作用する波浪を以下の2パターンに設定した。

- ・汀線直角方向に対して 0° (SE 方向から)
- ・汀線直角方向に対して 22.5° (SSE から)

の2パターンについて実施し、移動式潮流計測結果の結果に矛盾しないものをアマモ分布との比較に用いることにした。

(2)地形・底質の条件

アマモ分布範囲の底質は、後述のように中央粒径 $d_{50}=0.15\sim0.25\text{mm}$ であった。そこで、数値計算に用いた底質条件は、現地調査結果を参考に底質代表粒径 0.2mm 、底質代表密度は通常の砂粒子の代表的密度である 2.65g/cm^3 とした。

調査範囲には小規模な岩礁が点在して海底に露頭していたが、岩礁の存在が海

水流動に大きく影響を及ぼすことはないと判断し、計算に当たって海底が全て砂であるとした。

III-1-4 数値計算による外力算定結果

1. 計算条件

現地で計測・測定した条件、および既存調査結果を入力条件として調査対象地点のアマモ場に及ぼす外力条件を数値計算により明らかにした。

計算に用いた入力条件を表III-1-4に示す。これらの条件の詳細については第4章に詳述している。計算ケースは、 $H_{1/3}=3\sim 1\text{m}$ までを行った後、年間平均有義波高である $H_{1/3}=0.6\text{m}$ を追加した。

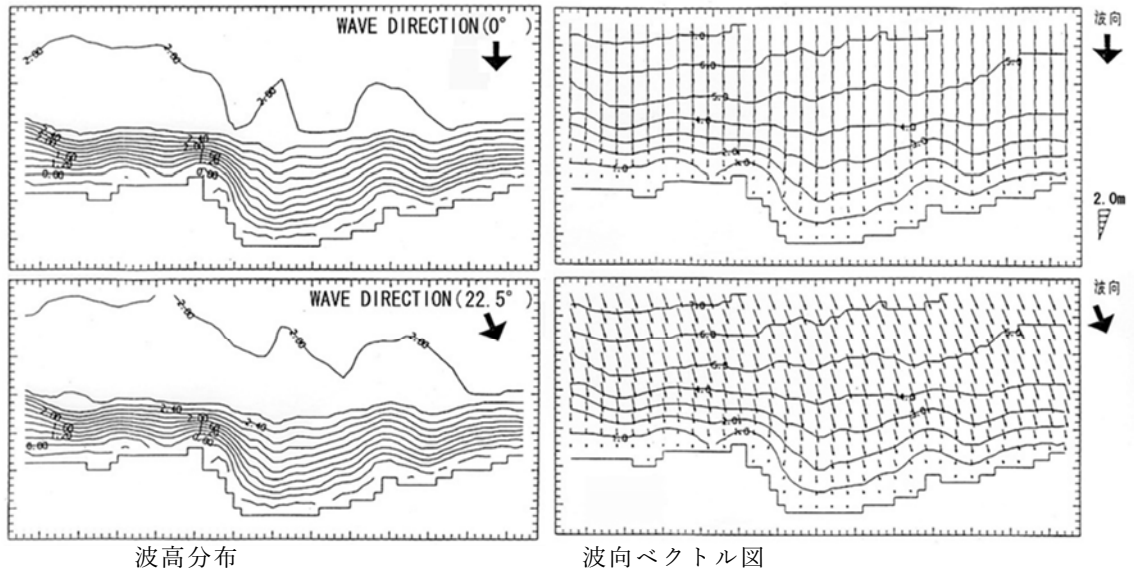
なお、年間平均有義波高である $H_{1/3}=0.6\text{m}$ の計算に当たっては、波浪の入射方向は汀線直角方向（ 0° ）のみとした。これは、波浪が小さい場合、殆ど汀線直角方向か波浪が入射していると考えたためである。

表III-1-4 数値計算に用いた入力条件

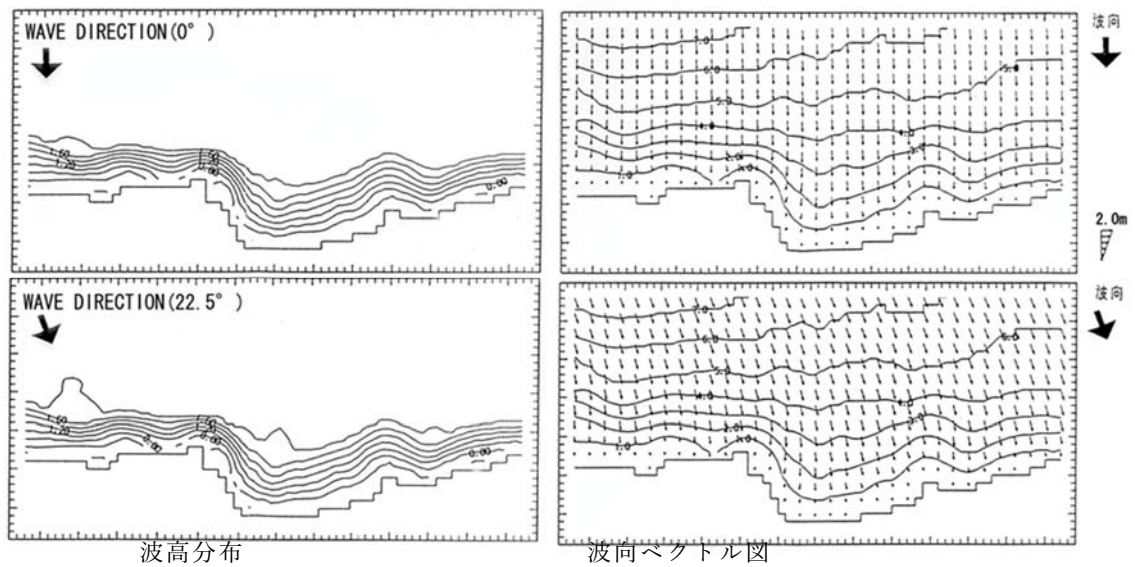
項目	条件	
波高・周期	$H_{1/3}=3.0\text{m}$, $T_{1/3}=7\text{s}$	数年に1回生じる程度の高波浪
	$H_{1/3}=2.0\text{m}$, $T_{1/3}=6\text{s}$	2～3年に1回程度生じる高波浪
	$H_{1/3}=1.0\text{m}$, $T_{1/3}=4\text{s}$	未超過確率 90% (月に1～2回程度発生)
	$H_{1/3}=0.6\text{m}$, $T_{1/3}=3\text{s}$	年間平均有義波
波向	汀線直角方向に対して 0° (SE方向から)	
	汀線直角方向に対して 22.5° (SSEから) ($H_{1/3}=0.6\text{m}$ では省略)	
底質粒径	0.2mm	計算範囲に均一に分布
底質密度	2.65g/cm^3	

2. 波高分布

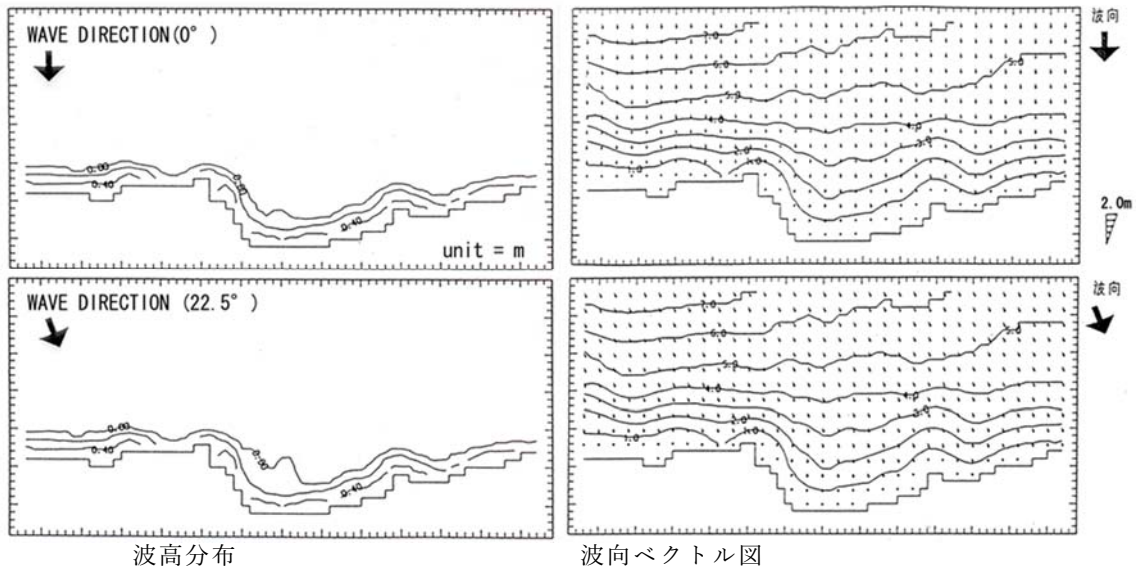
$H_{1/3}=3.0\text{m}\sim 1.0\text{m}$ までの各波浪条件の波高分布および波向きベクトル分布を図III-1-14～図III-1-16に示す。なお、 $H_{1/3}=0.6\text{m}$ においては、計算領域内の波高の差が小さかったため分布図作成に至らなかった。



図III-1-14 $H_{1/3}=3.0\text{m}$, $T_{1/3}=7\text{s}$ の波向きベクトルおよび波高分布計算結果



図III-1-15 $H_{1/3}=2.0\text{m}$, $T_{1/3}=6\text{s}$ の波向きベクトルおよび波高



図III-1-16 $H_{1/3}=1.0\text{m}$, $T_{1/3}=4\text{s}$ の波向きベクトルおよび波高分布計算結果

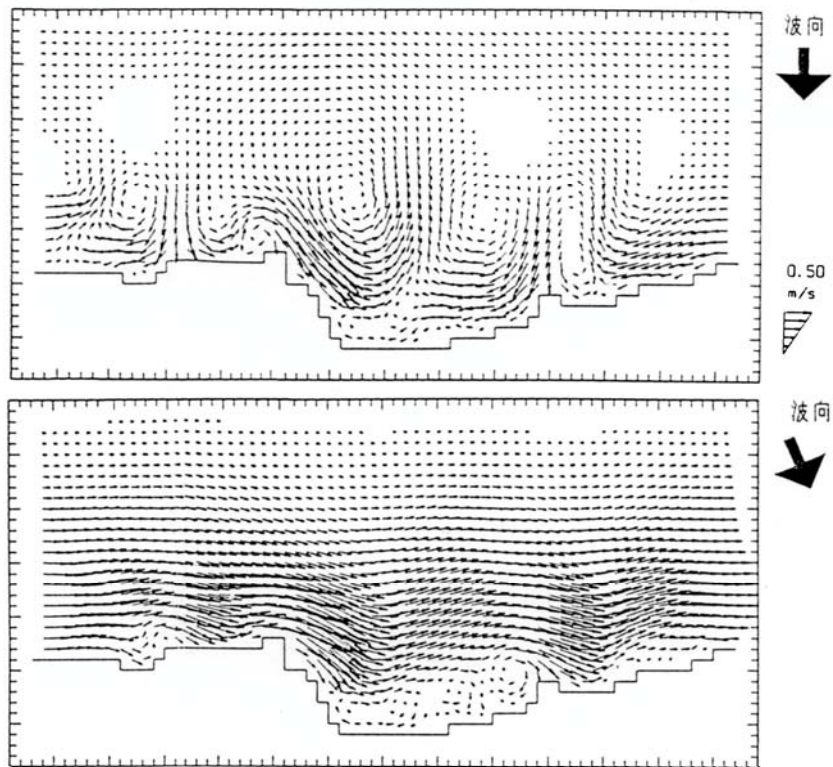
入射方向別の波高分布では、汀線直角方向に対して 0° でも 22.5° でも波高分布の傾向がほぼ同様であった。沖側から入射した波向きベクトルは、徐々に汀線直角方向に収斂していく状況が認められる。波高分布は、波高の大小によってほぼ相似形の分布となっている。

3. 海浜流分布

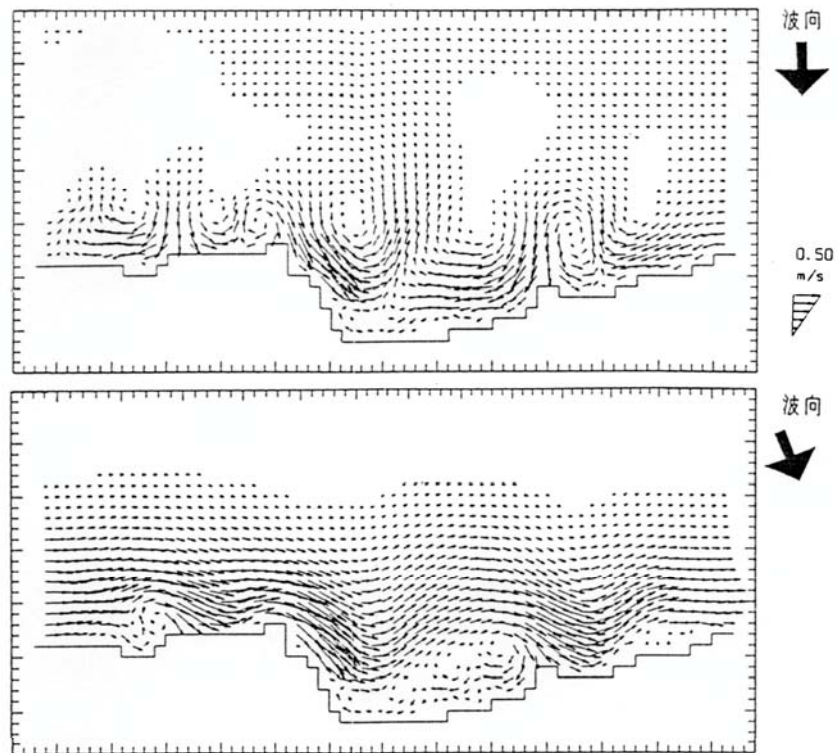
各計算条件における海浜流分布を図III-1-17～図III-1-19 に示す。波浪による海浜流は、湾の左側で最大となり、また湾の中央部やや右側で明らかな環流域が認められた。なお、 $H_{1/3}=0.6\text{m}$ においては、計算領域内の波高の差が小さかったため分布図作成に至らなかった。

海浜流の分布は、垂下式流速計による調査結果と同様、竹岡海岸の湾入部に海浜流による緩い環流が形成されていることが確認された。また、海浜流速は、 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ の高波浪時にアマモが分布している湾内の左側（SW側）の岸近くで 50cm/s 程度になっていた。

計算された海浜流は、潮汐とは無関係に波浪によって引き起こされる流れを



図III-1-17 $H_{1/3}=3.0\text{m}$, $T_{1/3}=7\text{s}$ の海浜流分布計算結果



図III-1-18 $H_{1/3}=2.0\text{m}$, $T_{1/3}=6\text{s}$ の海浜流分布計算結果

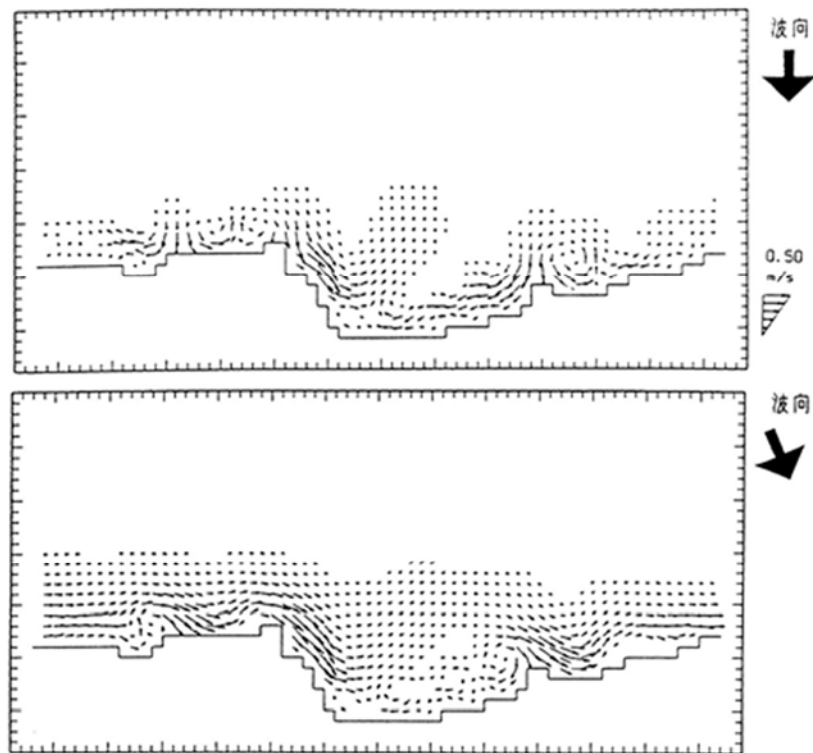


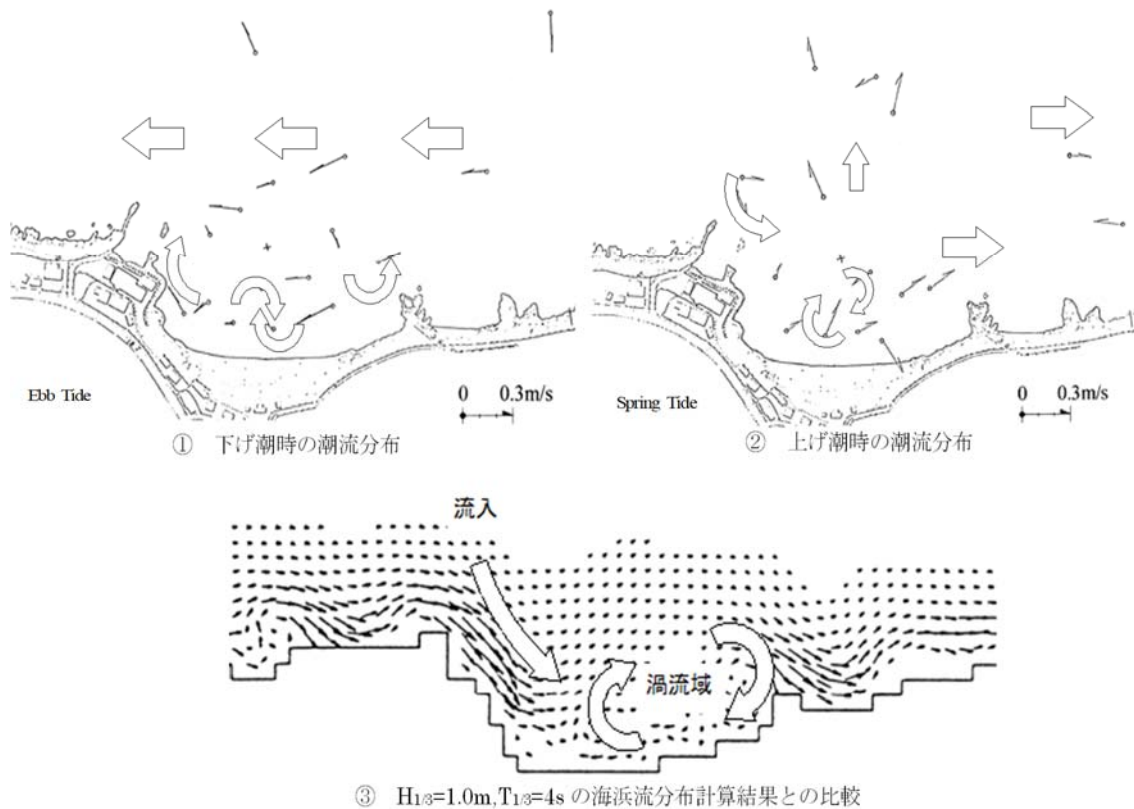
図 III-1-19 $H_{1/3}=1.0\text{m}$, $T_{1/3}=4\text{s}$ の海浜流分布計算結果

示している。このため、流速計を垂下して計測した波向きとは、正確に一致することが稀である。しかしながら、図 III-1-20 に示すように計算結果と実測結果は以下の点で定性的に整合していた。

- ・ 竹岡海岸の湾の中央部やや右側に渦領域が発生している。
- ・ 湾の中央部付近に沖側に向かう流れが存在している

これらは、海岸に入射した波浪が湾の奥部で渦領域を形成し、また波浪により湾内に侵入した水塊が湾外に出て行く流れ（離岸流）を形成していたたである。

再現計算による海浜流の分布は、湾内に形成される渦領域が入射角 22.5° の方が明瞭に再現されていた。また、水深 $4\sim 5\text{m}$ より浅い部分の波向きや海浜流ベクトル分布には殆ど相違が認められなかった。



図III-1-20 潮流実測値と計算の比較

4. シールズ数分布

シールズ数の分布は、基本的に等水深線に平行の状況であり、また波高分布とほぼ相似形で、波高が大きくなると、シールズ数の大きさもそのまま増大する状況であった。

シールズ数分布状況を図III-1-21～図III-1-24に示す。なお、図中には細砂の限界シールズ数の $\phi=0.11$ とシートフロー状態となる $\phi=0.5$ のコンターを示している。シールズ数は概ね水深に比例している。これらのことから、調査地点のアマモ場分布範囲の殆どの部分は底質が移動しうる状況であった。

なお、底質移動の限界シールズ数 ϕ は、本地点のような細砂の場合で $\phi=0.11$ と考えた。これには、Shibayama and Horikawa (1982)および清水ら(1990)より

設定した。同様にシートフロー状態となる状況を $\phi=0.5$ と設定した。シールズ数は、厳密に底質の移動状態を定義するものではなく、この数値を示すあたりで底質移動状況が変化することを表している。

波高が 2.0 m 以上になると、計算範囲全域がシールズ数 $\phi>0.5$ となり、全域の底質がシートフロー状態で移動する。即ち、検討対象範囲全体の海底表面の細砂よりなる底質表面が波浪・海浜流により層状に移動しているものと考えられた。

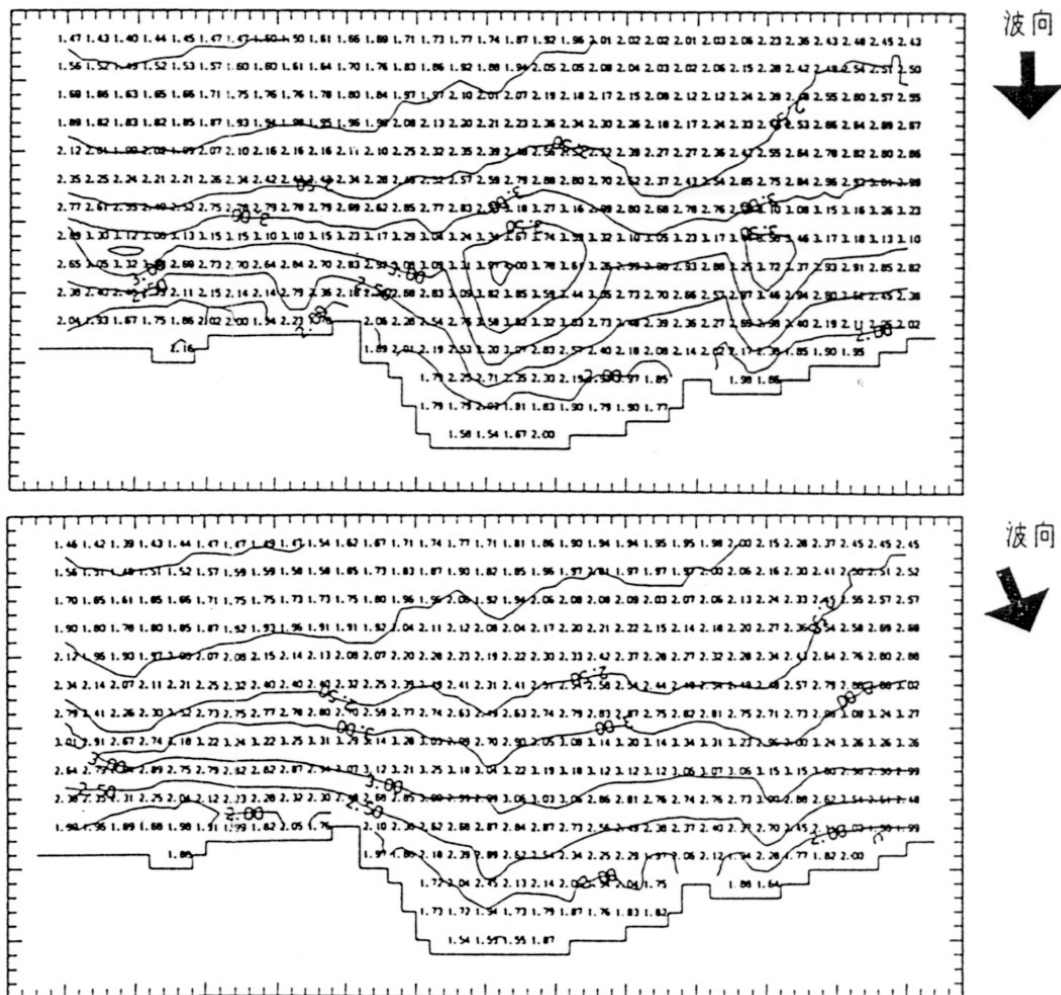
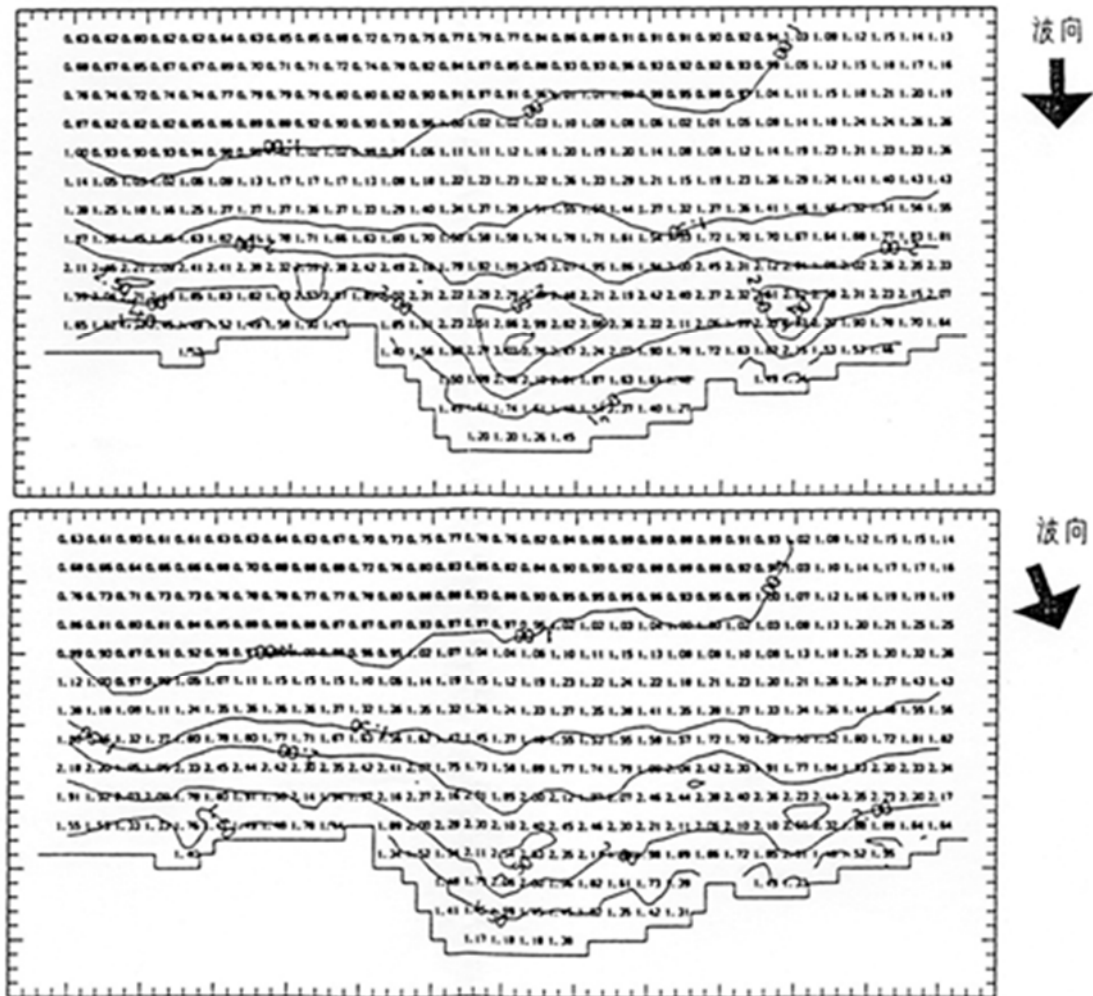
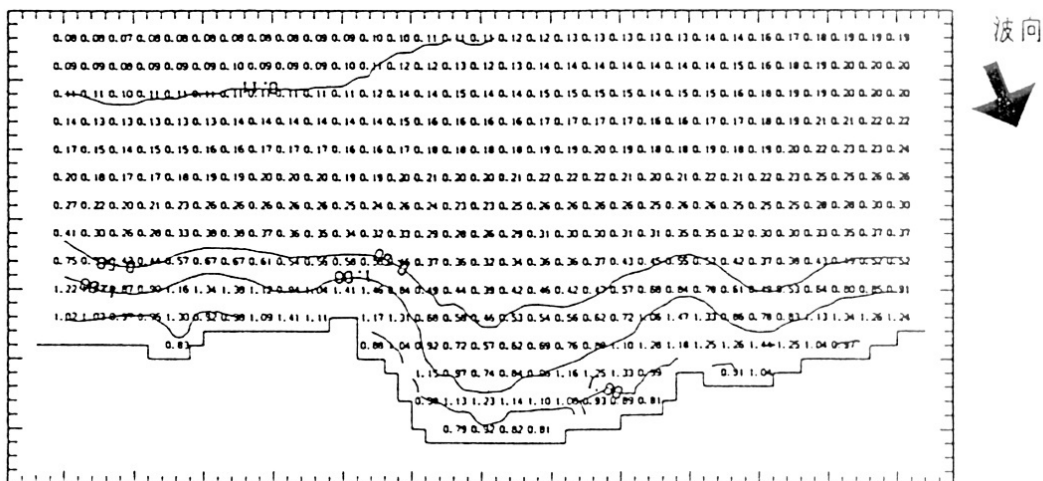
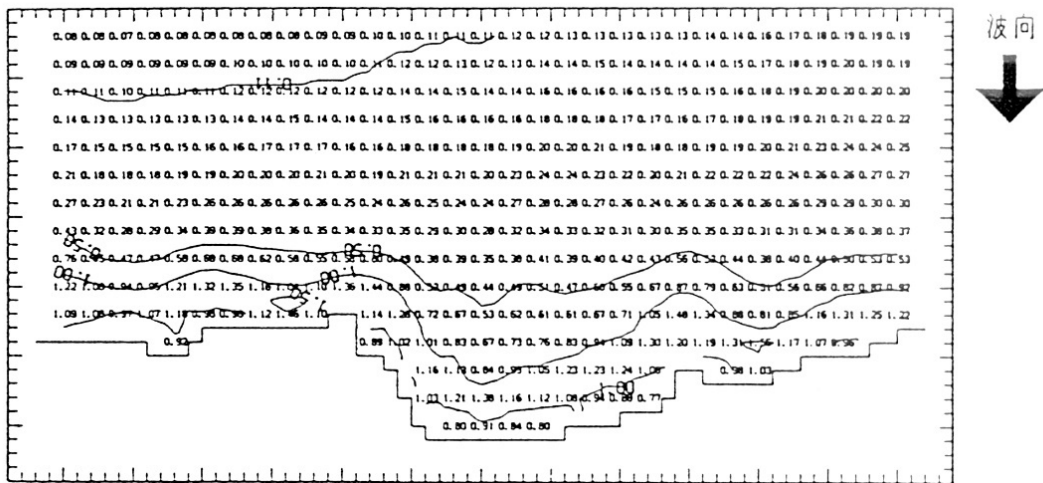


図 III-1-21 $H_{1/3}=3.0\text{m}$, $T_{1/3}=7\text{s}$ のシールズ数分布計算結果

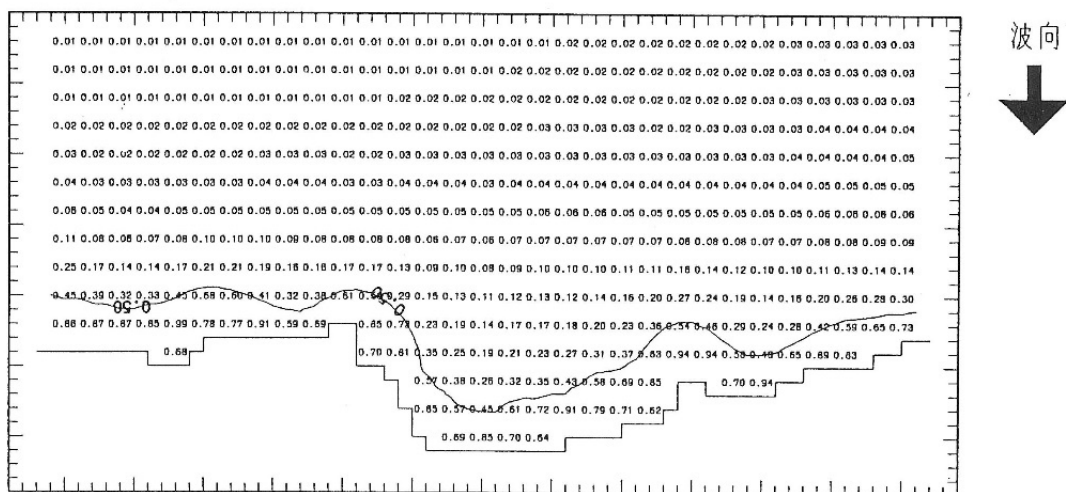


図III-1-22 $H_{1/3}=2.0\text{m}$, $T_{1/3}=6\text{s}$ のシールドズ数分布計算結果

1カ月に何回か発生する程度の高波浪である $H_{1/3}=1.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=4\text{s}$ の条件では、汀線付近でシールドズ数 $\phi > 0.5$ となり底質移動がシートフロー状態になっているものの、アマモ群落が分布していた湾の中央部付近で概ね $\phi < 0.5$ となり浮遊移動状態にあった。また、計算領域の沖側の水深約 7m (T.P.基準) 以深では、シールドズ数 $\phi < 0.11$ となり、砂の移動限界より小さい値を示した。年間平均有義波高の $H_{1/3}=0.6\text{m}$ 、 $T_{1/3}=3\text{s}$ の条件では、概ね水深 1m 以深でシールドズ数 $\phi < 0.5$ でシートロー状態にならず、さらにアマモ分布域である水深 3~5m より深い場所で $\phi < 0.11$ となり、砂の移動限界より小さい状態であった。



図III-1-23 $H_{1/3}=1.0\text{m}$, $T_{1/3}=4\text{s}$ のシールズ数分布計算結果

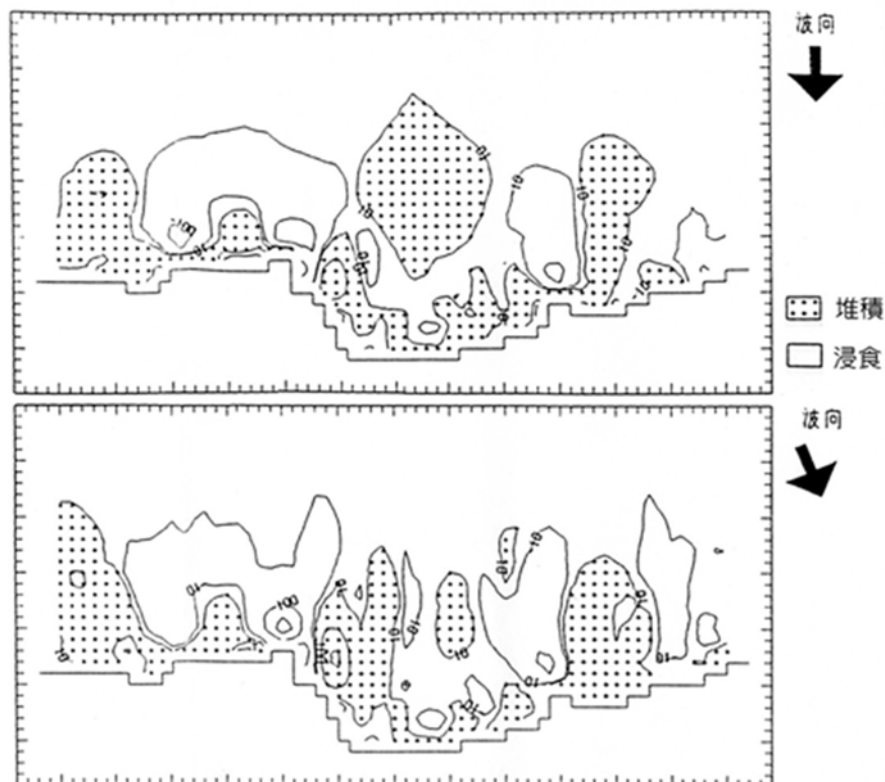


図III-1-24 $H_{1/3}=0.6\text{m}$, $T_{1/3}=3\text{s}$ のシールズ数分布計算結果

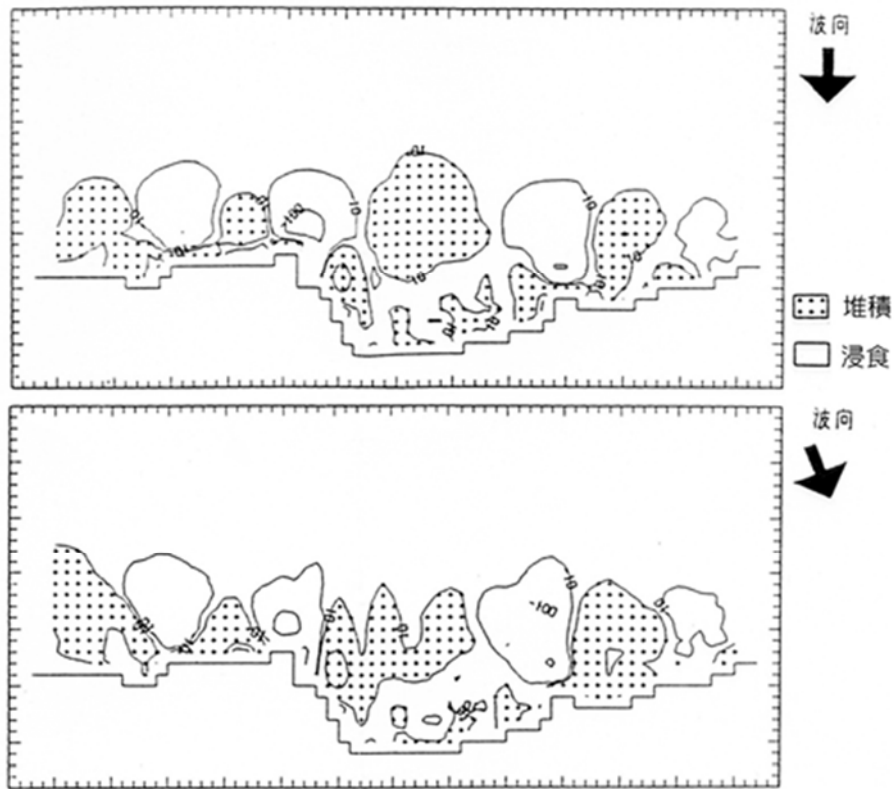
5. 地形変化量分布

計算範囲の全範囲が均一の砂であると想定した場合の地形変化量を図III-1-25～図III-1-28に示す。地形変化は計算が収束するまでの最大1,000秒と短時間であるものの、その間の変化量は微少である。このため、その状態が24時間継続したと仮定した地形変化状態を示し、この浸食状況と堆積状況を図中に示した。ただし、±10cm未満の変化については示していない。

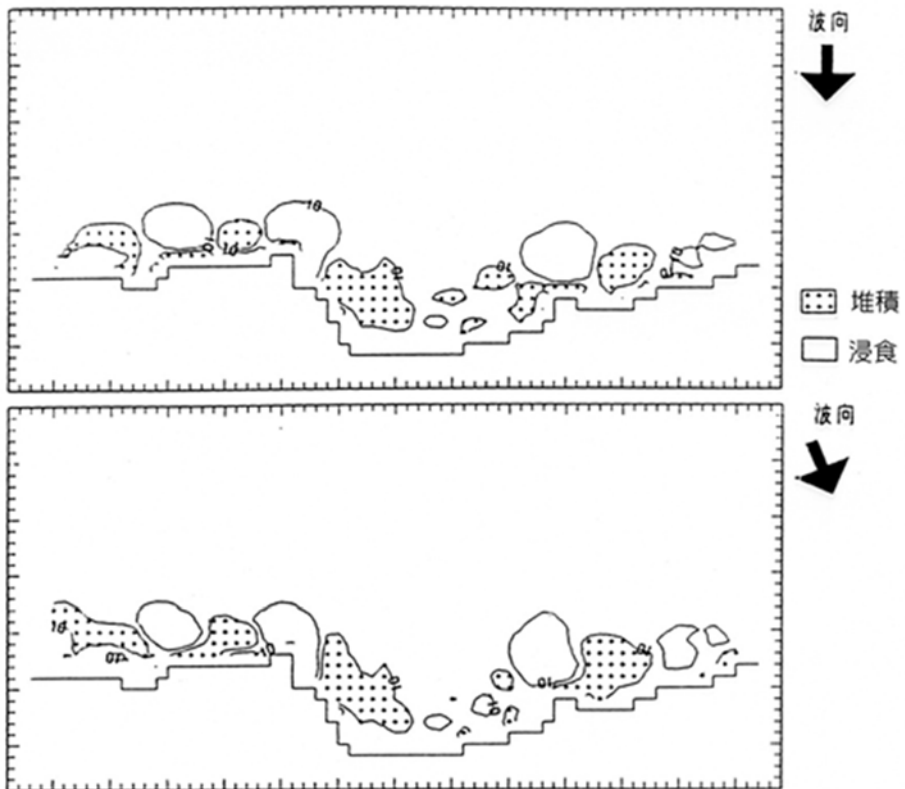
砂の移動による水深変化は、アマモ分布調査範囲の境界部岸寄りの部分および湾中心部岸寄りの一部が侵食を受け、湾内左側岸寄りの部分が堆積を受ける領域であった。地形変化の傾向は、波高が変化しても概ね同様である。即ち、湾内のSW付近が堆積傾向であり、その対面にある湾のNE側が侵食領域となっている。また、湾の中央部は堆積傾向である。



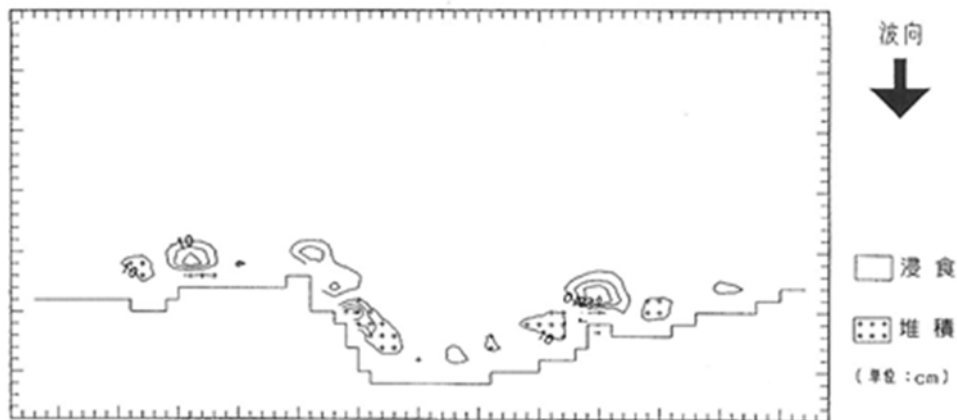
図III-1-25 $H_{1/3}=3.0\text{m}$, $T_{1/3}=7\text{s}$ の地形変化量分布計算結果



図III-1-26 $H_{1/3}=2.0\text{m}$, $T_{1/3}=6\text{s}$ の地形変化量分布計算結果



図III-1-27 $H_{1/3}=2.0\text{m}$, $T_{1/3}=6\text{s}$ の地形変化量分布計算結果



図III-1-28 $H_{1/3}=0.6\text{m}$, $T_{1/3}=3\text{s}$ の地形変化量分布計算結果

6. 検討に用いる波浪条件

(1) 入射角度

入射方向別の波高分布では、汀線直角方向に対して 0° でも 22.5° でも波高分布の傾向がほぼ同様であった。

検討対象海域では、高波浪が SW 方向から来襲することが多いと考えられ、汀線直角方向に対して 22.5° のケースの方が現実が発生し得る状態と考えた。さらに、再現計算による海浜流の分布は湾内に形成される渦流域は、入射角 22.5° の方が明瞭に再現されていた。このため、アマモの分布と比較する外力平面分布には、汀線直角方向に対して 22.5° のケースを用いることにした。

ただし、 $H_{1/3}=0.6\text{m}$ のケースでは、入射波が通常時の波浪のため、汀線直角方向に対し 0° の方向からのみ入射すると考えた。

(2) 波高

数年に 1 回程度来襲する台風によりアマモ場が消滅してしまうことがある。しかし、毎年数回程度来襲する程度の台風ではアマモ場が消滅しないと考えられる。そこで、通常発生する低気圧や通常の台風の来襲を考慮した波高を用いることにした。また、物理条件よりアマモ分布条件を抽出する上で、アマモが分布してい

る検討範囲内で明確な環境勾配が形成される波高であることも重要な要素である。

数値計算結果の項および図Ⅲ-1-29 に示すように $H_{1/3}=2.0\text{m}$ 以上の状態では、底質安定性を示すシールズ数がアマモの分布する $-2.0\sim-6.0\text{m}$ を含む検討範囲の全域にわたりシートフロー状態を示す $\phi>0.5$ となっている。即ち、この状態では、全域の底質が全体に移動する状態になっている。なお、周辺海域での波浪観測結果でも $H_{1/3}>2.0\text{m}$ の条件は、大型台風時に稀に記録される。

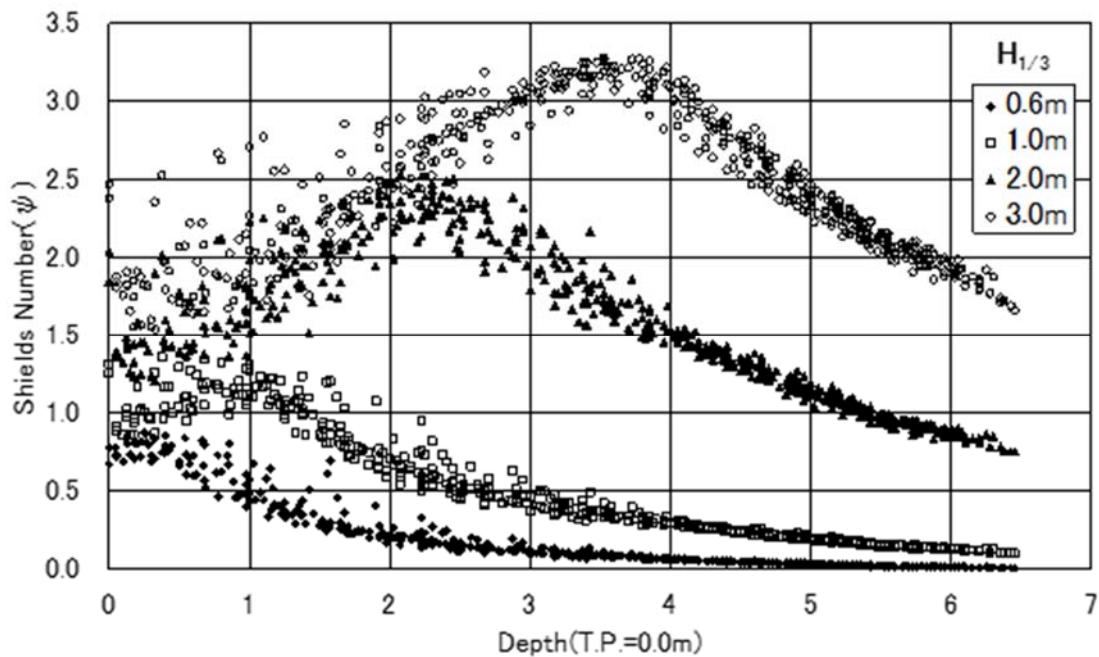
計算に用いた波高のうち、 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ および $H_{1/3}=0.6\text{m}$ を用いてアマモ分布場所の条件の抽出を試みた。この波浪状態は、通常の高波浪状態（未超過確率90%）および年平均有義波高である。

$H_{1/3}=1.0\text{m}$ による外力分布は、アマモ群落が分布している範囲で外力の大小の範囲を持っているので、アマモ分布可否を外力より評価する上で何らかの傾向が現れることが期待された。また、 $H_{1/3}=0.6\text{m}$ は、年間平均有義波高であり、平常時の状況を表すものである。このときには、検討範囲の大部分でアマモの分布可能の領域になっていることが予想された。

(3)水深別外力分布状況

水深別の流速、シールズ数および水深変化量の分布は、図Ⅲ-1-29 に示すように波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ におけるシールズ数が岸近くの水深 $-1.0\sim-2.0\text{m}$ （T.P.基準）で極大となり、水深増加につれて減少している。これは、岸近くの水深において碎波が起こるためと考えられる。波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ のとき、碎波水深は 0.75m と推定された。シールズ数より底質の安定性を評価すると、波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ のとき水深 -3.0m 以浅より $\phi>0.5$ の部分が見られ、シートフロー状態となる場所があることが認められた。地形変化量変化は、水深 $-3.0\sim-4.0\text{m}$ 以浅で侵食域と堆積域が分かれている。

一方、波高 $H_{1/3}=0.6\text{m}$ では、水深別の流速、シールズ数および水深変化の分布



図III-1-29 $H_{1/3}=0.6\text{m}, 1.0\text{m}, 2.0, 3.0\text{m}$ における水深別シールド数（計算値）

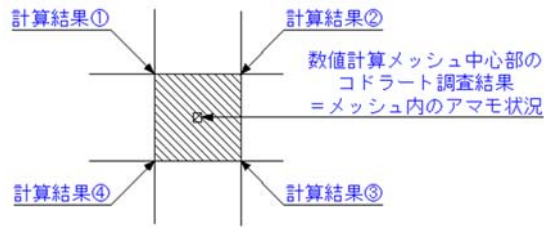
形状が概ね波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ の状況そのままに各数値が小さくなっているものの、シールド数と地形変化量が水深 T.P.-2.0m 以浅の部分で水深に対する地形変化量のばらつきが大きくなっていることが明らかである。これも $H_{1/3}=1.0\text{m}$ のときと同様、碎波との関係が考えられる。 $H_{1/3}=0.6\text{m}$ のときの碎波水深は 0.6m と推定される。

海域では強風は SW 方向より吹くこと、再現計算による海浜流の分布は湾内に形成される渦流域は、入射角 22.5° の方が明瞭に再現されていた。

III-1-5 計算結果とアマモ分布の比較

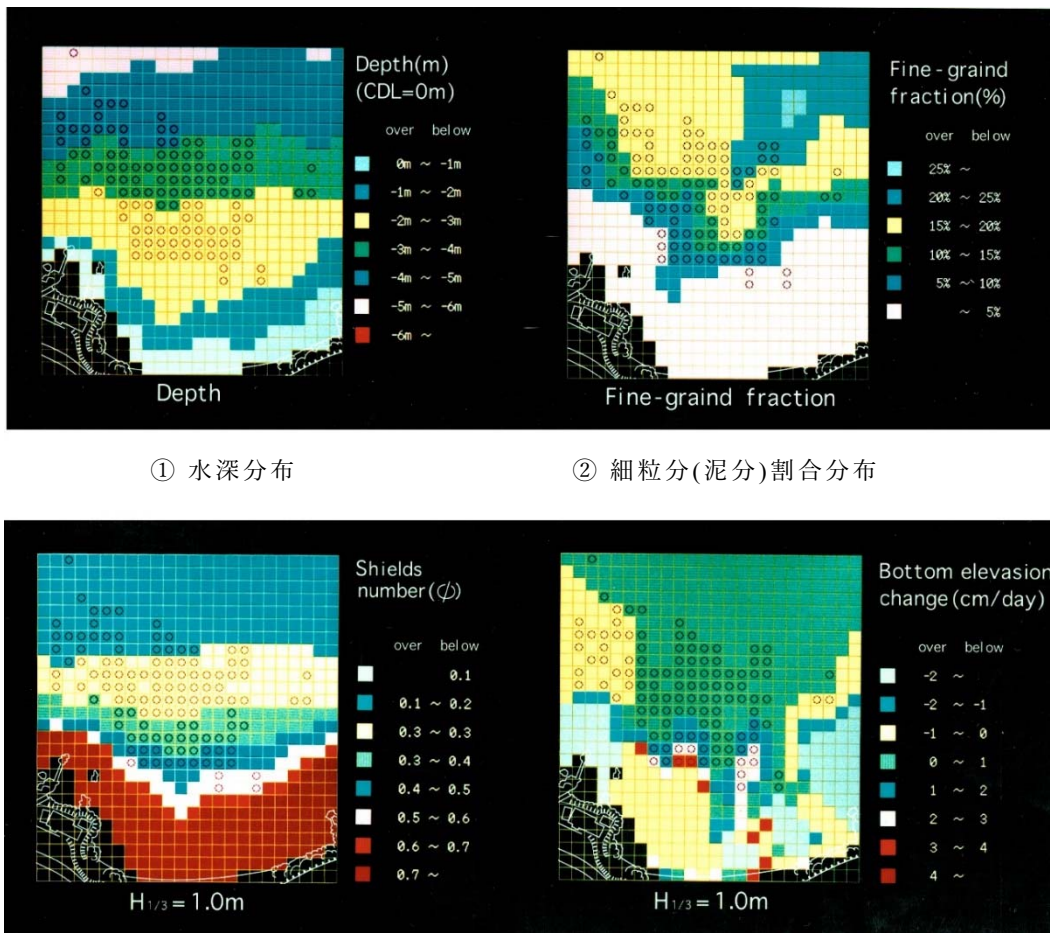
1. アマモ分布と物理量との比較方法

この条件で算出された海浜流速、シールド数、および地形変化量などの外力条件を物理量とした。その他の条件として、水深および底質のシルト以下割合実測



図III-1-30 物理量計算結果とアマモ群落との比較要領図

値および内挿計算値を用いた。これらの条件を調査範囲のメッシュに割り当て、各調査メッシュにアマモの分布と比較した。各メッシュでのアマモの分布状況は、メッシュ中央部でコドラート調査した実測値である。底質・アマモの分布はメッ



① 水深分布

② 細粒分(泥分)割合分布

③ シールズ数分布

④ 細粒分割合分布

図III-1-31 アマモ分布調査メッシュに当てはめた諸条件

シユの平面のデータであるが、数値計算による物理的外力データはメッシュを構成する交点の保っているデータである。このため、1つのメッシュの持つ物理的外力データは、**図III-1-30**に示すようにメッシュを構成する4つの交点のデータを単純平均したものをを用いた。

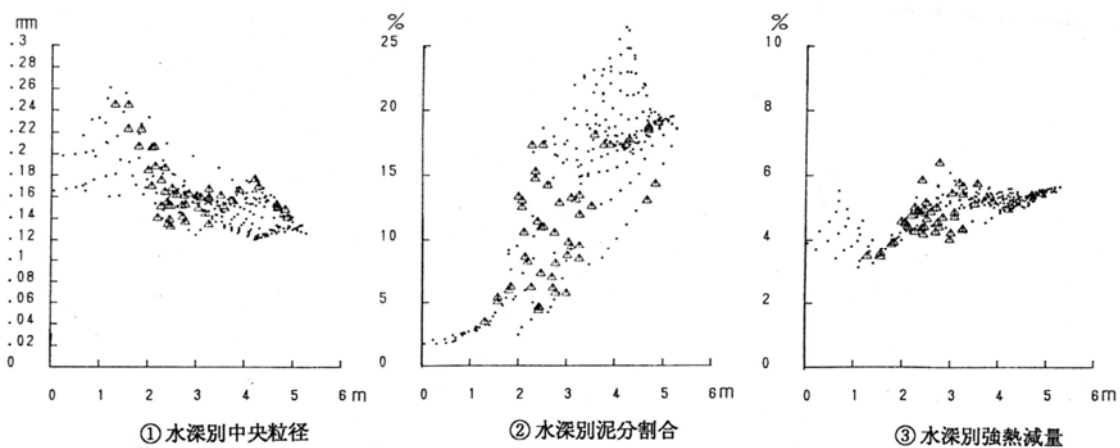
アマモ群落の分布と比較する水深、細粒分含有割合、海浜流速分布、シールド数分布のメッシュ状況を**図III-1-31**に示す。各メッシュの持っているデータを互いに比較してアマモ分布状況の条件抽出を試みた。

数値計算結果および底質分布との比較対象とするアマモの分布状況は、冬期・衰退期の調査結果を用いた。冬季のアマモ群落衰退期は、アマモ場の範囲が縮小し分布が疎らであり、かつアマモの草丈が低く、アマモの存在による流れや砂の移動といった物理的現象への影響が少ないと考えられた。このため、波や流れによる底質安定性については、海草の存在を考慮しなくてよいものと考えた。

2. アマモ分布メッシュの条件

(1)底質との比較

底質条件によるアマモ場条件検討範囲は、アマモ分布範囲調査範囲内での底質の中央粒径およびシルト以下の細粒子成分の割合と強熱減量によるアマモの分布地点の結果を用いて底質状況が内挿法によって推定できるものとした。それらの結果を**図III-1-32**に示す。調査範囲内でアマモが確認されたメッシュの底質中央粒径は $d_{50}=0.12\sim 0.24\text{mm}$ 、強熱減量は $3.5\sim 6.2\%$ の限られた範囲に分布していた。また、アマモが確認されたメッシュの底質の泥分（シルト以下成分含有割合）は $3\sim 19\%$ の範囲であった。アマモは、調査範囲内の中央粒径および強熱減量についてほぼ全範囲に分布するものの、泥分が 19% を越える範囲に分布していなかった。



図III-1-32 アマモ分布調査メッシュに当てはめた諸条件

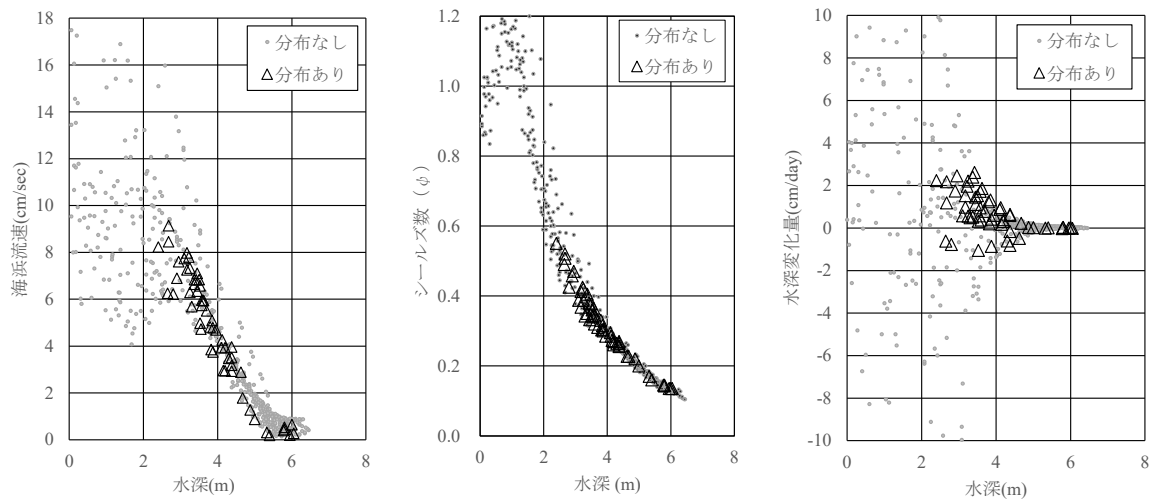
(2) 物理的パラメータとの比較

$H_{1/3}=1.0\text{m}$ および 0.6m で再現した物理条件の水深別海浜流速、シールズ数および水深変化量の分布を図III-1-33～図III-1-34に示す。入射角は 22.5° であり、冬季にアマモの分布が認められたメッシュと認められなかったメッシュを識別している。流速およびシールズ数は、岸近くの水深-1～2m で極大となり、水深増加につれて減少している。また、水深変化は、水深 3～4m 以浅で侵食域と堆積域が分かれている。

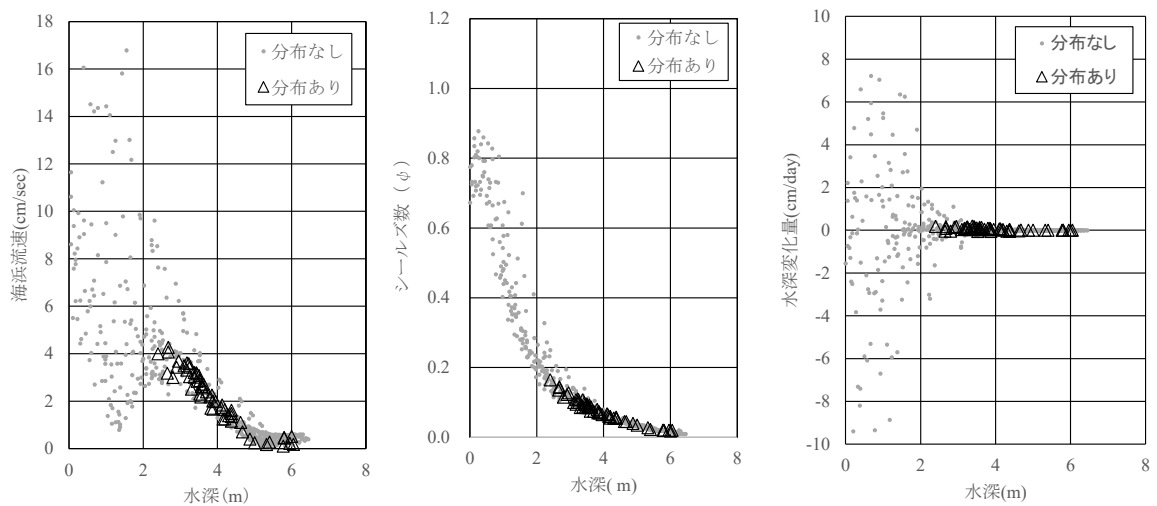
$H_{1/3}=1.0\text{m}$ の条件で冬季にアマモ群落は、海浜速が約 8.5cm/s 以下、シールズ数が約 0.5 以下、かつ堆積傾向の場所に主として分布していた。また、底質移動がシートフロー状態の激しい砂移動が生じる場所にアマモは殆ど分布していなかった。

$H_{1/3}=0.6\text{m}$ の条件でアマモは、海浜流速 4.0cm/s 以下、シールズ数 $\phi \leq 0.2$ 、かつ浸食堆積が殆ど見られない場所に分布していた。

$H_{1/3}=1.0\text{m}$ の条件における再現計算結果より、アマモ分布メッシュの海浜流、シールズ数、地形変化量の最大値、最小値および平均値±標準偏差(σ)を表III-1-5に示す。 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ の条件ではアマモ分布メッシュの平均シールズ数が $\phi = 0.3$



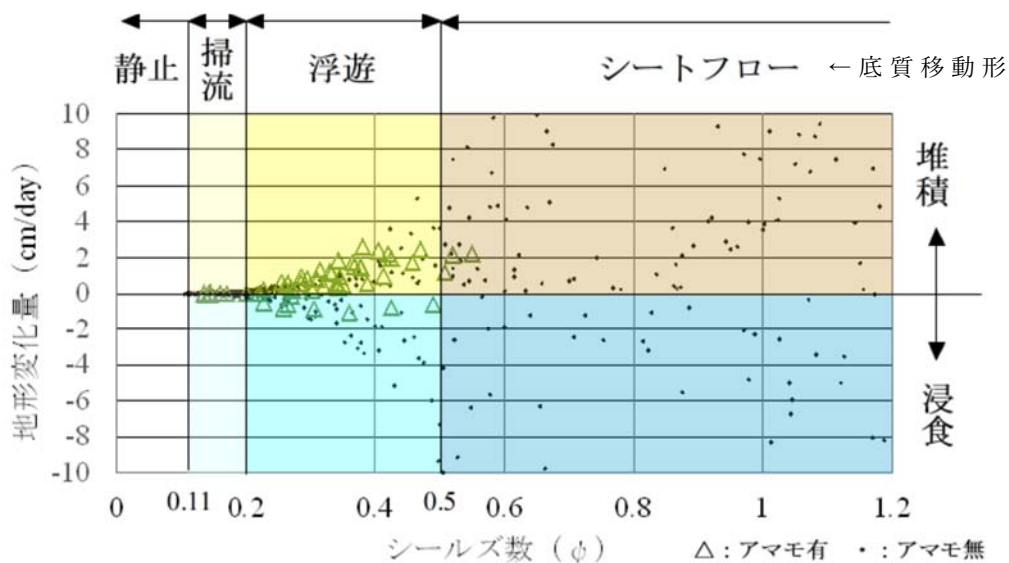
図III-1-33 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ における水深別・パラメータ別アマモ分布



図III-1-34 $H_{1/3}=0.6\text{m}$ における水深別・パラメータ別アマモ分布

表III-1-5 アマモが見られたメッシュの物理条件

項目	単位	最小値	平均値	最大値	平均±標準偏差(σ)
海浜流速	cm/s	0.16	4.08	8.77	0.11~6.50
シールズ数		0.14	0.31	0.55	0.21~0.41
地形変化量	cm/day	-1.05	0.69	2.46	-0.18~1.56



図III-1-35 浸食・堆積傾向および底質移動形態別アマモ分布状況

であり、大部分のアマモ分布メッシュは底質移動が掃流状態から浮遊状態の範囲であった。アマモ分布メッシュの平均地形変化量は、僅かに堆積する領域にあり、平均±σでも大部分が堆積領域であった。

地形変化量とシールズ数は底質の移動傾向を明確に示すと考えられる。そこで、シールズ数を横軸、水深変化量を縦軸に、アマモ分布の有無をプロットした。この状況を図III-1-35に示す。なお、 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ 、入射角は 22.5° を用いた。

アマモの分布範囲は、シールズ数がおおよそ $\phi < 0.5$ であり、かつ堆積傾向の場所であることが示されている。また、アマモは、砂移動がシートフロー状態にならない範囲に分布しており、シートフロー状態の激しい砂移動が生じる場所に殆ど分布していない。これらの浸食・堆積領域別、底質移動形態別のアマモ分布メッシュ数を表III-1-6に示す。

$H_{1/3}=1.0\text{m}$ の条件でアマモ分布メッシュの大部分は、堆積領域かつ底質移動が浮遊移動状態の部分にあった。この傾向は、冬季の衰退期、夏季の繁茂期ともに同様であった。

表III-1-6 アマモが見られたメッシュの底質移動形態

シールズ数と 底質移動状態		堆積領域		侵食領域	
		メッシュ数 合計	アマモ 存在 メッシュ数	メッシュ数 合計	アマモ 存在 メッシュ数
$\phi < 0.2$ 掃流状態	繁茂期	171	10	31	12
	衰退期		4		4
$0.2 < \phi < 0.5$ 浮遊状態	繁茂期	138	82	63	12
	衰退期		37		8
$0.5 < \phi$ シートフロー状態	繁茂期	110	5	71	-
	衰退期		3		-

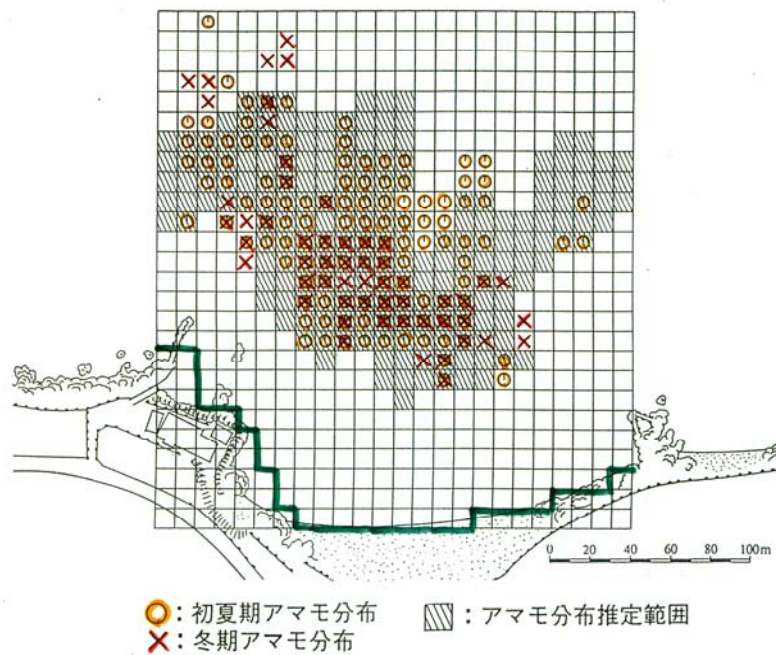
(3) アマモ分布の再現

アマモの存在する底質および物理的条件について現地調査を行った竹岡海岸の数値計算結果にフィードバックして、現実のアマモ場分布範囲の再現性について検討を行った。竹岡海岸の波高 1m、周期 4s、入射角 22.5° の条件におけるアマモの分布範囲の推定条件を以下のように設定した。

- ・水深 : -5.5m 以浅(水深は T.P.基準)
- ・泥分割合 : 19%以下(底質調査範囲外の部分については外挿法で推定)
- ・海浜流速 : 8.0cm/s 以下
- ・シールズ数 : $\phi < 0.5$ 以下 (シートフローにならない範囲)
- ・地形変化量 : -0.5~4.0cm/日

アマモ分布調査範囲内の各メッシュに割り当てた物理条件の再現計算により得られた海浜流速、シールズ数、および地形変化量と水深、泥分割合をアマモ分布の有無と比較した。この検討によるアマモ場の推定分布範囲を図III-1-36 に示す。

アマモ場推定分布範囲は、アマモ場の分布が最も広がる初夏期のアマモ場分布範囲をほぼ表している。数値計算結果より推定したアマモ分布メッシュのうち、現地調査によりアマモが確認された割合(整合割合)は、表III-1-7 に示すように



図III-1-36 アマモ分布推定範囲

夏季に50%以上であったが、冬季の分布縮小時に20%程度であった。

表III-1-7 推定分布範囲と整合割合

アマモ分布推定メッシュ数		実際の分布と整合したアマモ分布メッシュ数	推定範囲から外れたアマモ分布メッシュ数	アマモ分布範囲外を推定したメッシュ数	実際の分布メッシュ数
冬季	202	41 (20.3%)	12 (5.9%)	161 (79.7%)	56 (27.7%)
夏期		105 (52.0%)	13 (6.4%)	97 (48.0%)	118 (58.4%)

III-1-6 考察

アマモ場の存在に物理的な外力が影響することは、以前より指摘されており、特に漂砂と密接に関係があると考えられる。

その海域の通常発生する高波浪条件を入力条件にシミュレーションにより再現計算した物理条件を用いたアマモ分布の推定範囲は、現地調査によりアマモ場が最も拡大する範囲を概略表していた。これは、アマモ

が物理的条件の適合する場所にのみ生育することを示している。アマモは、種子および地下茎の枝分かれによって増殖するが、この増殖生態を考えた場合、アマモと砂の移動に次のような関係が考えられる。

アマモの種子は、底質の表面から 10cm 程度に埋没し、底質が黒変するような嫌气的状態で発芽している。発芽のため底質が嫌气的条件になるためには、堆積傾向にあることが必要である。

アマモ場の潜水観察によれば、成長したアマモは底質表面下 10cm 程度の地下茎より上に向かって伸長する。地下茎や発芽直後の若芽は、底質上に露出すると各種生物によるダメージを受けやすいので、底質の中で保護される必要がある。したがって、砂の移動による地形変化は、地下茎や芽が露出しない程度であることが必要である。

さらに、アマモは、地下茎と根が底質内の土粒子を掴むことによって自らの持つ浮力以上の固着力を持ち、海底に維持されている。ここで海底表層の砂泥が波浪などによりシートフロー状態で移動すると、アマモの根による底質固着力が弱まり、浮上流失することが容易に推察される。この状況を図 III-1-37 に示す。

これらの物理パラメータのうち、シールズ数は、海浜流による底面せ

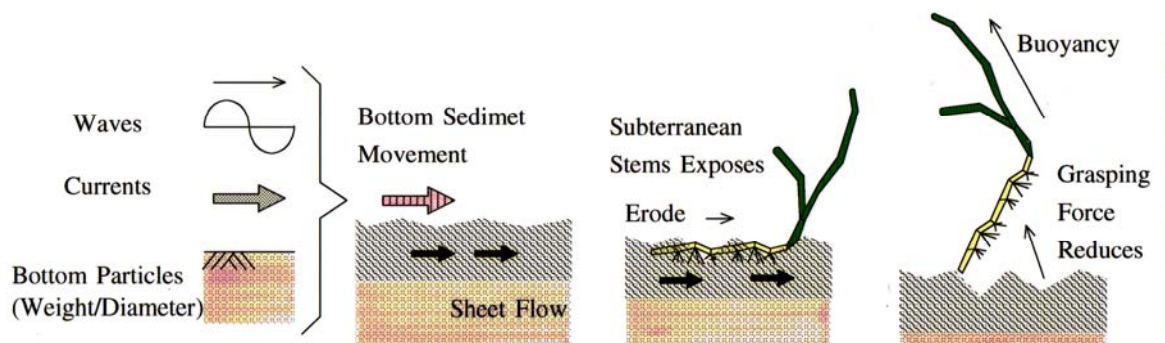


図 III-1-37 シートフロー状態におけるアマモ流失過程
〔Nakase(2000)発表ポスターより〕

ん断力により算出される。よって、重要なパラメータはシールドズ数と地形変化量であると考えた。波高 1 m と 0.6 m における漂砂の移動形態および侵食、堆積傾向別のアマモ分布を図 III-1-38 に示す。本図には、各パラメータに対するアマモ分布メッシュ数のヒストグラムを併記した。

堆積傾向にある領域では漂砂がシートフロー状態の範囲でもアマモが僅かながら分布しているが、最もアマモの分布が多い範囲は浮遊移動状態の部分である。一方、侵食傾向にある領域では漂砂がシートフロー状態の部分にはアマモは見られない。これは、前述したアマモの生態的特性を満たす外力条件の記述に整合するものである。

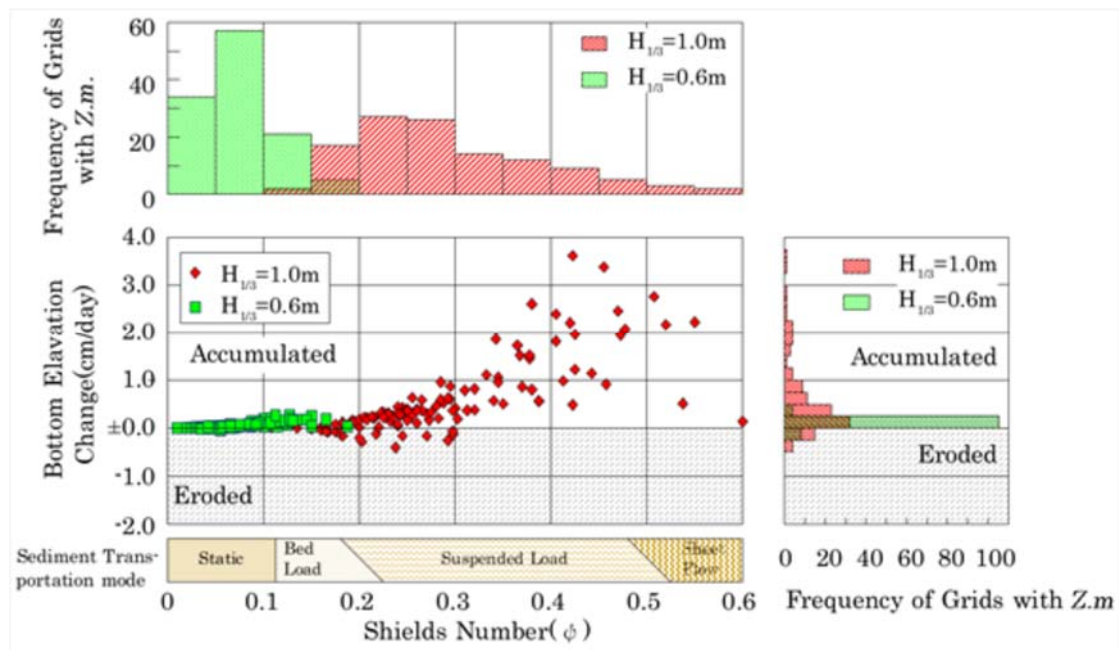


図 III-1-38 シールドズ数および地形変化によるアマモ分布状況

堆積傾向にある領域において、アマモ分布は、漂砂移動が掃流状態にある範囲よりも浮遊状態の場所に多い。これは、アマモの生育にとって適度に堆積物などを浮遊状態にして移動させ得る状態が好適環境である

こと、即ちアマモの葉の表面に土砂などが堆積しない状態やアマモの葉表面の生物付着が漂砂によって防止される状態などが望ましい環境であることを示唆するものと考えられる。

現実のアマモ場造成にあたっては、アマモ場造成適地を選定すると共に、砂の移動などの外力条件を制御する必要がある。本研究によるアマモ場成立条件は、このような場合の設計指針になるものと考えられる。

島谷ら(2000)による年平均有義波高相当の波浪を作用させた種子埋没状態の水槽実験および現地調査で同じシールズ数の場所に分布する実生株数を比較した事例において、**図 III-1-39**に示すように実生株が確認された部分のシールズ数は、水槽実験による種子埋没率が高い部分と殆ど一致していた。

アマモの種子は還元状態で発芽することが知られている。波浪や潮汐が作用する沿岸海域にあって種子が還元状態になるということは、砂泥な

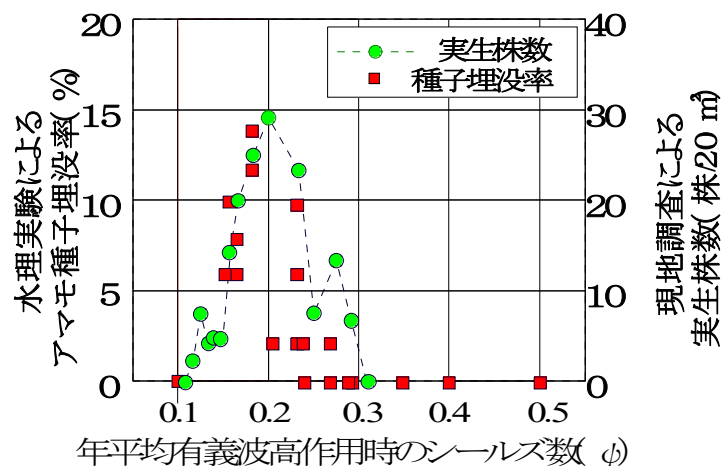


図 III-1-39 シールズ数別アマモ種子埋没状況

どの堆積物によって種子が埋没することを意味する。

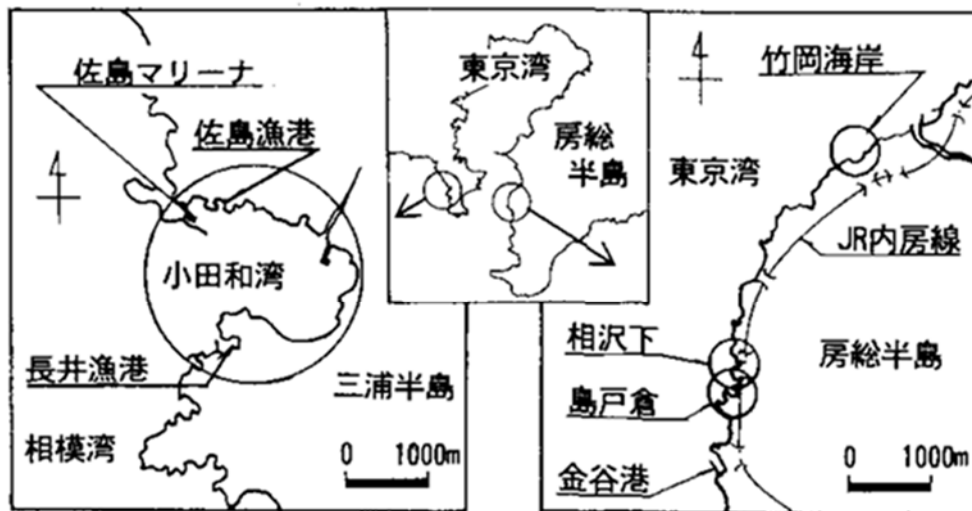
III-2 他地点との比較

III-2-1 はじめに

アマモ場造成を行う場合、平面的にどこまでの範囲がアマモ場となり得るか、およびアマモ場を造成する場所の外力制御目標を把握することが重要である。これらを現地調査より求めると多大な労力と時間がかかるが、現地適用性が明らかになっている物理条件の数値計算を適用することによりアマモ場造成を検討する場合、その物理的適地を選定する上での有力な手段となる。

千葉県富津市竹岡海岸地先のアマモ場について、アマモ分布調査と波浪や砂の移動に関する数値計算を同一海域で行い、両者を比較し、物理的外力条件からアマモの分布条件を抽出し、現地に通常発生する高波浪が作用するときアマモ分布場所の底質が全体的に移動するシートフロー状態にならない範囲の場所がアマモ分布可能域であることが明らかになった。

しかし、1カ所のみでの検討では信頼性に欠けるため、竹岡海岸で実施したものと同一方法でアマモ分布条件を抽出する手法を図III-2-1に示す千葉県富津市およ



図III-2-1 検討対象地点の位置図

び神奈川県横須賀市のアマモ場に対して適用させ、この方法普遍性の確認を試みた。

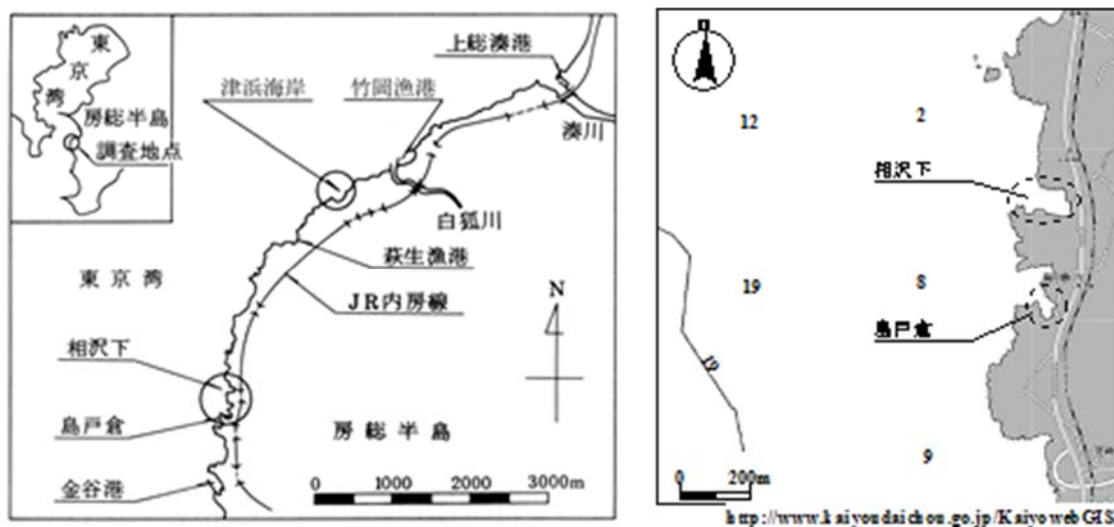
III-2-2 千葉県富津市相沢下地点と島戸倉地点

(1)調査地点

相沢下地点と島戸倉地点は、**図III-2-2**に示すように岬を挟んで隣接する海岸であり、事前の周辺海域におけるアマモ場分布現地踏査によりアマモ場の存在が確認されていた。

この相沢下地点と島戸倉地点のアマモ場について竹岡海岸で実施したのと同様の方法で三次元地形変化モデルによる数値計算を行い、竹岡海岸で得られた「当該海域における通常発生する高波浪条件で底質移動がシートフロー状態にならない範囲で移動する」場所にアマモが分布していることの確認を行った。

この海域におけるアマモ場分布範囲や密度などおよび流況に関する情報がなかったため、アマモの分布調査およびアマモ場の底質調査を実施し、併せて周辺海域の流況調査とアマモ場の波高流向流速測定も行った。



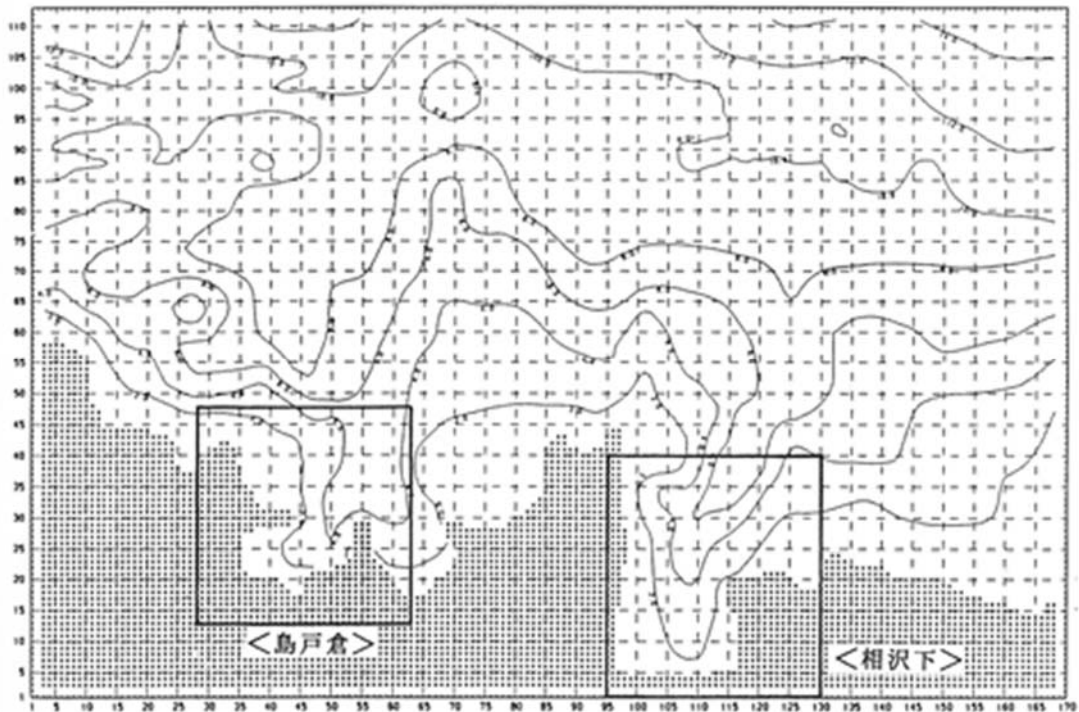
図III-2-2 相沢下・島戸倉地点位置図



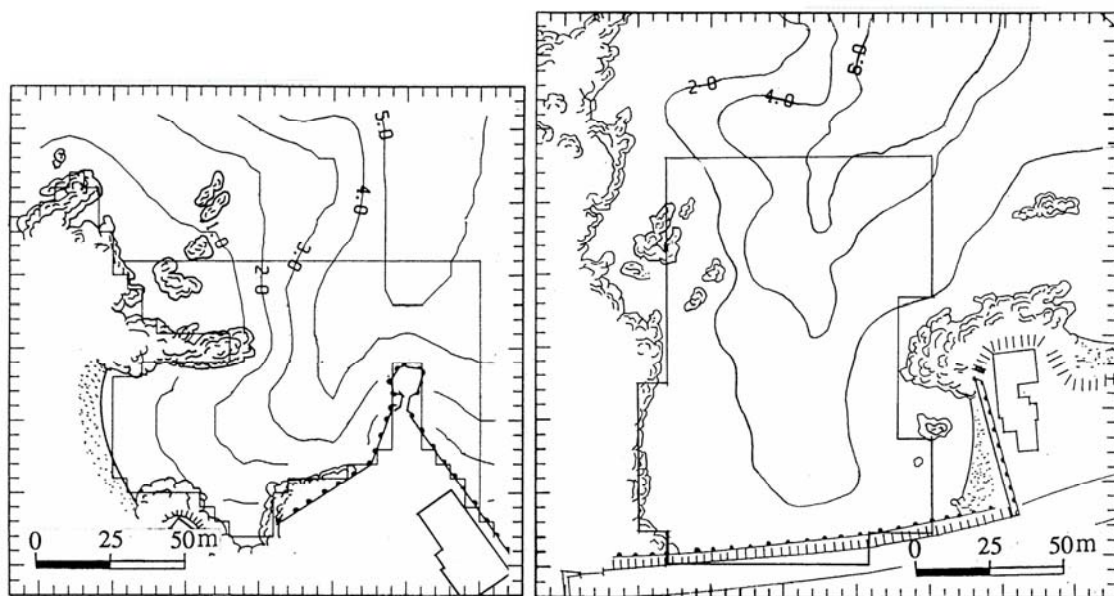
①相沢下

② 島戸倉

図III-2-3 相沢下・島戸倉地点の状況



図III-2-4 相沢下・島戸倉地点周辺の計算メッシュ



① 島戸倉部分拡大図

② 相沢下部分拡大図

図III-2-5 相沢下・島戸倉地点アマモ場付近の計算メッシュ拡大図

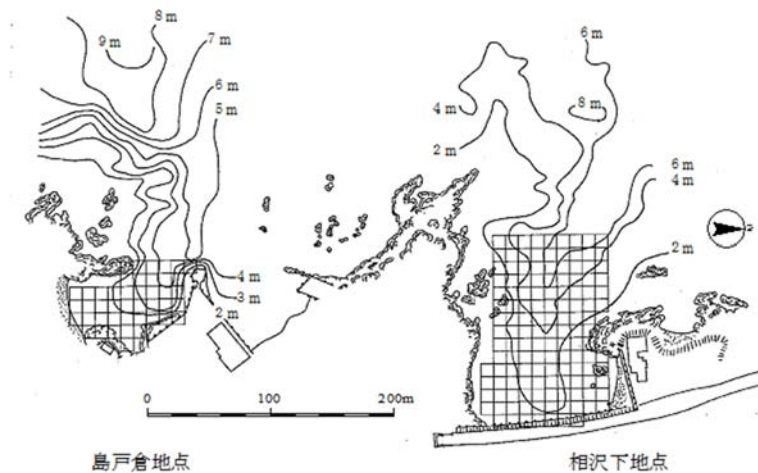
調査地点の名称のうち、「相沢下」は、対象地点の陸上部に存在していた施設名(ドライブイン相沢)から便宜的に命名したものである。「島戸倉」は住所表記上の地名である。相沢下と島戸倉は、岬を挟んで約200m離れているものの、両地点共に東京湾の西向き方向に開いており、入射波浪が同一方向であると考えられる。よって、外力評価は、両地点一括して検討できる。

両地点は、いずれも岩礁に囲まれた湾であり、湾の中央部から湾奥部の砂泥域にアマモが分布している。相沢下地点にはビーチが形成されず、汀線部分が直接護岸になっている。一方、島戸倉地点は、岩礁に囲まれたポケットビーチを形成しており、ビーチ部分が小型漁船の配置場所として利用されている。相沢下と島戸倉地点は、沖合に岩礁の浅瀬が存在し、高波浪時にこの部分で碎波が観察されている。

(2)調査方法

①海底地形および調査メッシュ

検討対象の相沢下、島戸倉地点は、岬を挟んで隣接した同一方向に開口してい



図III-2-6 島戸倉・相沢下地点アマモ観察メッシュ

る小湾であるため、外力の数値計算は両者を同一の計算メッシュの中で一括して実施した。調査地点周辺の海底地形は、沖合側は海上保安庁発行の東京湾口部の海図W1062 (INT5304) を用いたが、アマモの分布する岸寄りの浅い部分の海底地形の詳細が明らかでなかった。そこで、1989年11月に音響探知式測深機により海底地形状況を調査した。調査方法は竹岡海岸で実施した手法をそのまま用いた。即ち、各対象地の海浜に目印を設標し、岸から沖側に向け音響探知式測深機を搭載した調査船(モーターボート)をトランシーバーで誘導して水深を測定した。

アマモ場近傍での実測、沖合での海図による深浅情報を統合してアマモ分布調査範囲を含む数値計算範囲の水深メッシュを設定した。相沢下および島戸倉を統合する状況で設定した、沿岸方向820m×岸沖方向540m調査メッシュを図III-2-3に示す。調査メッシュは基本的に10m×10mとしたが、アマモ分布範囲が竹岡海岸より小規模であるため、調査範囲のうち図III-2-4に示すアマモの分布している湾内については1メッシュのサイズを5m×5mとした。

②アマモ分布状況調査

相沢下・島戸倉地点のアマモ分布状況調査は、アマモ場が縮小する冬期（1991年1月）と拡大する初夏期（1991年6月）の2回実施した。なお、両地点は隣接している場所であるため、両地点の調査は同時に実施した。

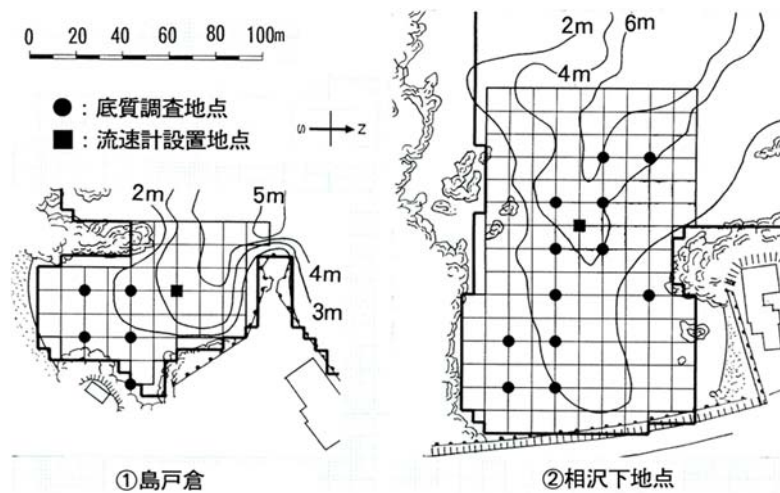
アマモ被度および周辺海底状況は、竹岡海岸で実施した方法と同様に水深測定および数値計算メッシュと整合させて図III-2-5と図III-2-6に示す調査メッシュを設定した。観察は陸上設標点より10mごとに印をつけたロープを海中に伸長し、これを基準に10m×10mのメッシュ中心において2m×2mのコドラート内のアマモ群落の平均的草丈、被度および群度を記録した。被度と群度はブロン-ブロンケの基準にしたがった。

③底質採取

アマモ分布状況の調査時に図III-2-7に示す位置で潜水士がスコップにてサンプリングし、これらの底質の粒度組成分析を行った。分析方法は JIS A-1204（標準ふるいによる篩い分け試験）によった。

④物理条件測定

縮小期のアマモ分布調査時にアマモ分布状況調査メッシュ内の図III-2-6に示す位置に設置した水圧センサー付き電磁流向流速計による1991年1月28日12時～翌



図III-2-7 底質調査地点および流速計設置地点

29日12時までの24時間の連続波高・流速の連続測定を行った。

アマモ場分布調査時に携帯式垂下流向流速計(東亜電探製CM-2および鶴見精機製V-2)による上げ潮時および下げ潮時の流れの平面分布調査を行った。この調査の際、アマモ場周辺の任意の地点で計測器を垂下して計測を行った。計測位置は、六分儀で3点以上の目印からの角度を記録し、図面上で特定した。

⑤外力再現計算

津浜海岸(竹岡海岸)における外力評価に用いたものと同じ3次元海浜変形予測モデルを用い、波高、海浜流および地形変化量の平面分布について再現計算を行った。計算には図III-2-3に示した島戸倉・相沢下地点を包括する計算メッシュを用い、両地点とも一括して計算した。なお、海底地形調査結果より両地点とも湾口部の波浪進入方向側に浅瀬が存在し、さらにその後背部分(陸地側)で水深の増減が認められる。即ち、浅瀬部分が潜堤のような形状で湾口に存在している。このような地形では、入射する波浪が浅瀬上で碎波する。そこで、数値計算を行う上で入射する波がここで碎けて波高が低下することの考慮については、磯部(1986)の碎波式を用いた。

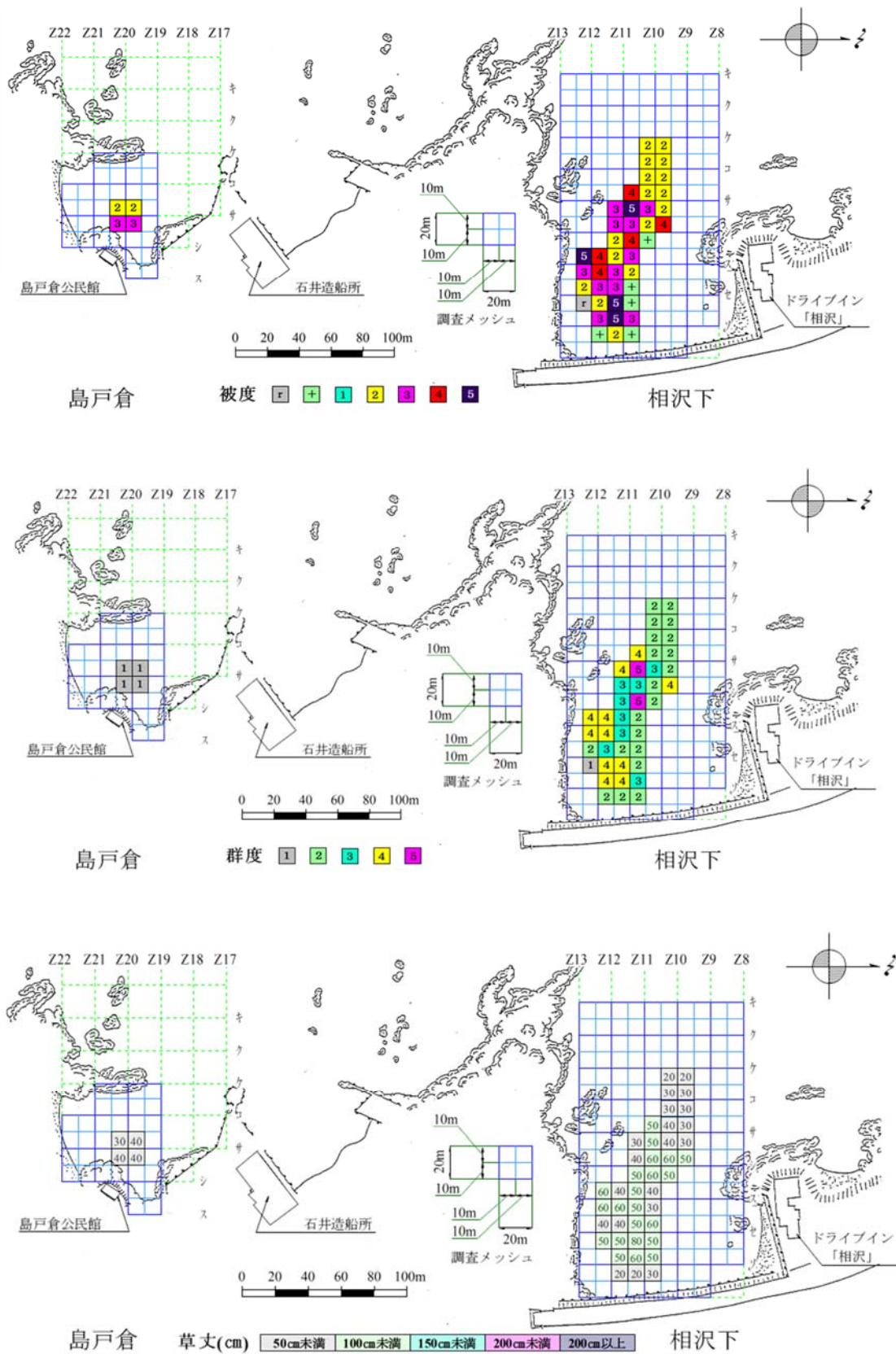
(3)調査結果

①アマモ分布状況

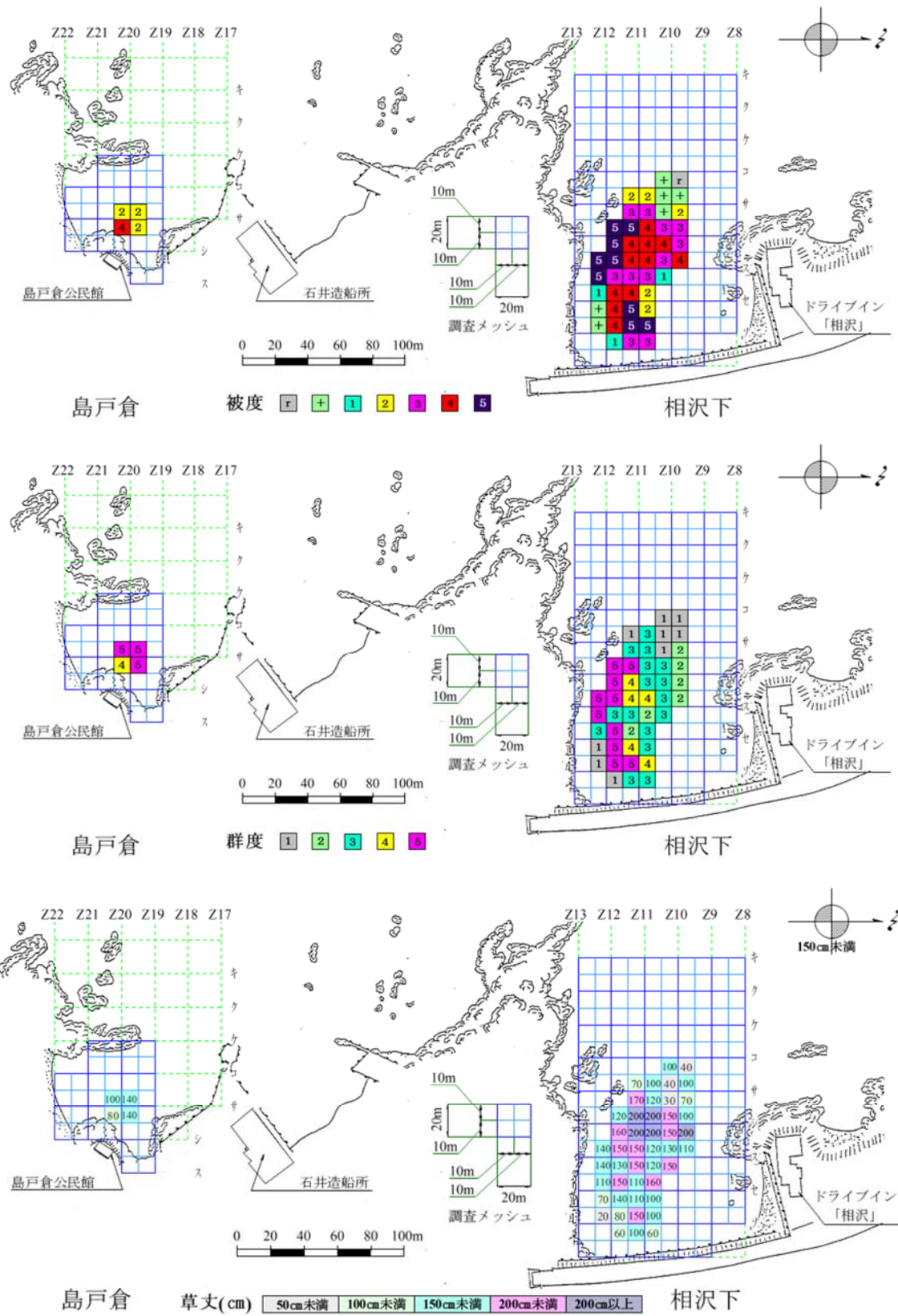
相沢下地点では、湾内の岩礁以外殆どの部分にアマモが分布している。また、島戸倉地点では、湾の奥部の一部分のみにアマモが分布しているが、周辺の岩礁部分にホンダワラ類およびカジメといった大形褐藻が分布していた。

両地点ともアマモは密生分布しており、初夏の繁茂期および冬季の衰退期ともにほぼ同じ場所に群落が確認された。島戸倉地点では花枝形成が認められたが、相沢下地点では花枝が殆ど認められなかった。

初夏の繁茂期および冬季の群落衰退期の両地点における各調査メッシュのアマ

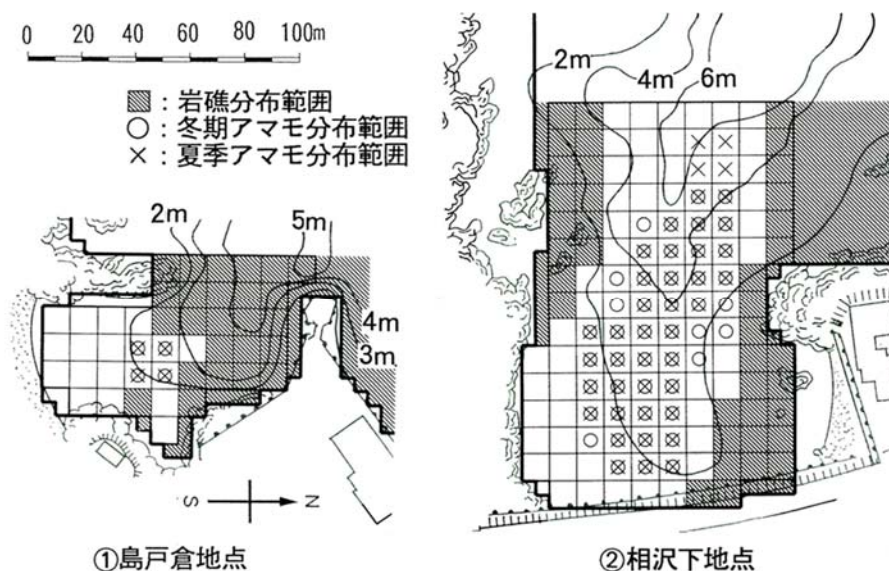


図III-2-8 島戸倉・相沢地区の冬季衰退期アマモ分布状況



図III-2-9 島戸倉・相沢地区の初夏繁茂期アマモ分布状況

その被度・群度・草丈を図III-2-8と図III-2-9に示す。また、初夏と冬季の両季節にアマモが見られた範囲を図III-2-10に示す。



図III-2-10 島戸倉・相沢地区の繁茂期と衰退期のアマモ分布状況

②底質分布

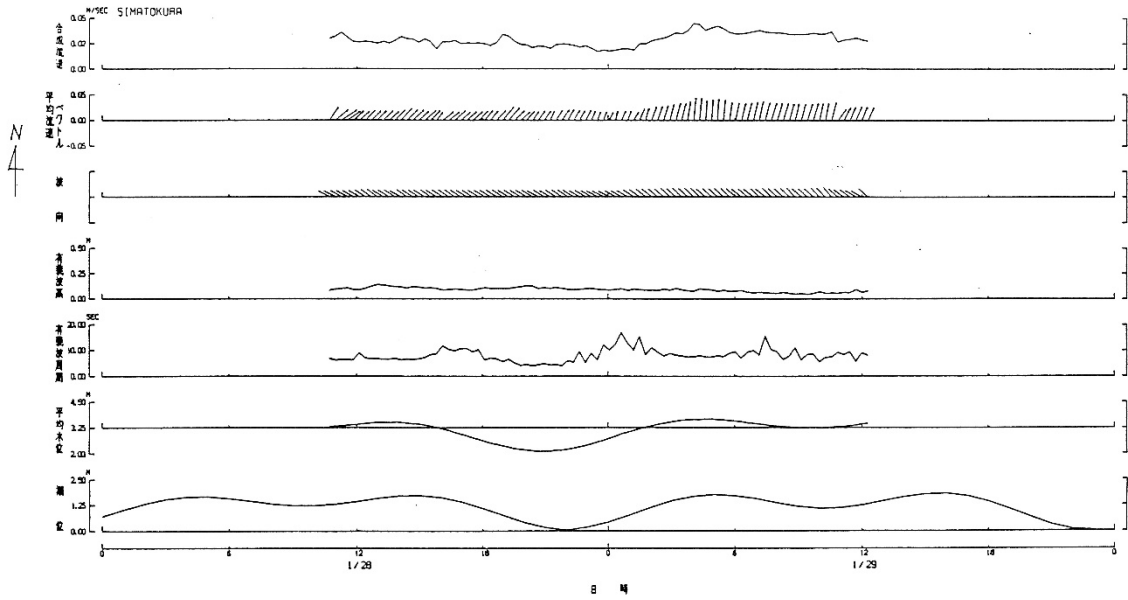
底質中央粒径は、相沢下地点で0.14～0.39mm、島戸倉地点で0.17～0.34mmであった。

③潮流測定結果

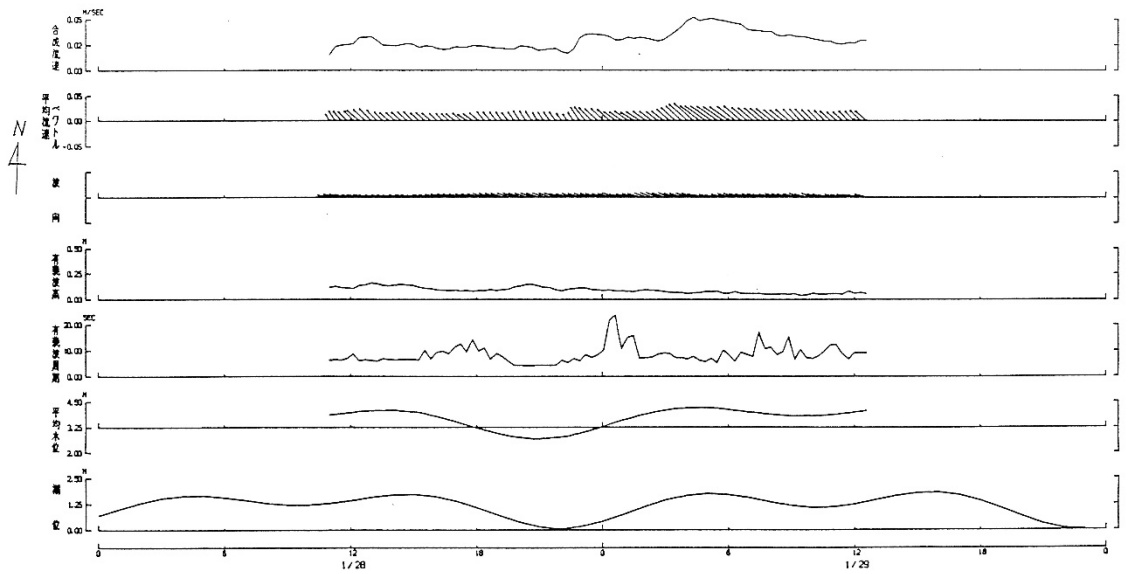
潮流は、1990年1月28日～29日に24時間連続測定した。各地点の合成流速、平均流速ベクトル、波向、有義波高、有義周期および平均水位を図III-2-11、図III-2-12に示す。なお、潮位については、近傍の君津毎時潮位表による計測時期の数値と併記した。計測値は、計測機センサーがある海底面より80 cm上の場所のものである。

島戸倉、相沢下において観察された流速は、平均2cm/sであり、最大でも5cm/s

を超えることがなかった。また、ベクトルの上からは明確な転流が認められず、湾内に吹き込む風の影響が大きいことが窺われた。



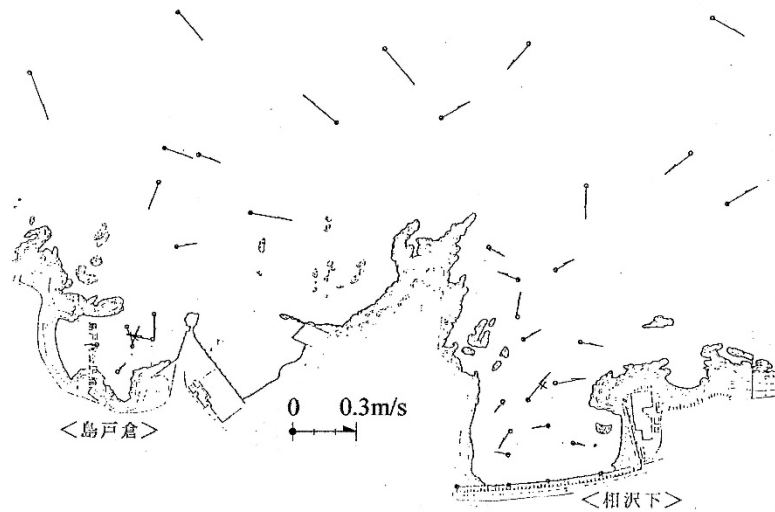
図III-2-11 島戸倉地点流況調査結果



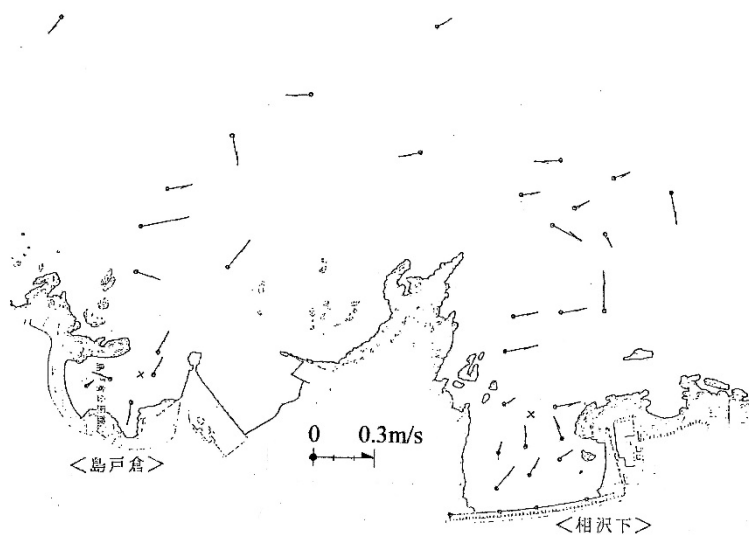
図III-2-12 相沢下地点流況調査結果

落潮および張潮時に計測した海底上1mの底層流向流速計測結果では、**図III-2-13**に示すように沖側の調査ポイントにおいて潮汐による明確な転流が認められた。一方、岸近くの岩礁付近では、流れの向きが様々な方向を示し、海底地形による複雑な流れの存在が示唆された。

1) 上げ潮時



2) 下げ潮時



図III-2-13 相沢下地点流況調査結果

(4)外力数値計算

①波浪条件

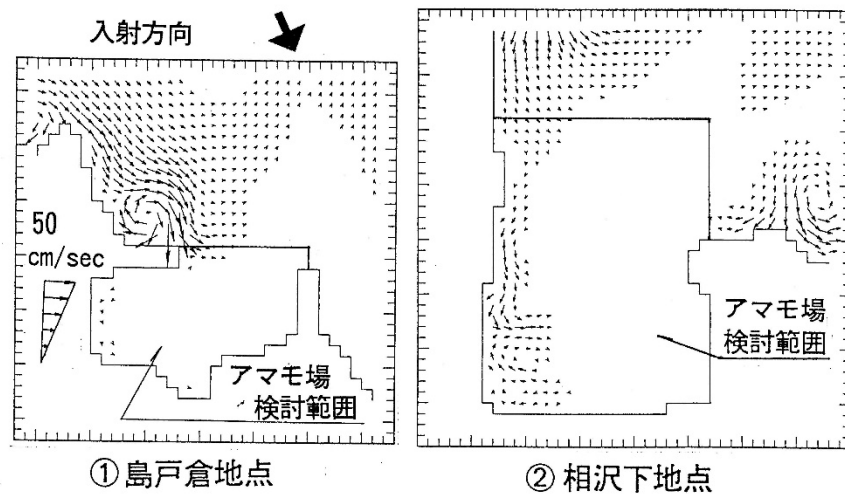
数値計算に用いる波浪条件は、竹岡海岸で用いた条件と同様にアマモにとって年平均有義波高よりもやや厳しくなる状況を考えた。

千葉県富津市の相沢下、島戸倉地点は竹岡海岸の至近であるため、作用する波浪がこれと同様な有義波高1m、周期4sとした。代表波の波向きは、高波浪時の波がSW方向から入射してくるので、海岸至近の調査メッシュ部分で汀線直角方向に対して22.5°から入射するとした。この波浪条件は、通常発生するやや高波浪の状況であり、未超過出現率90%、3回/月程度発生する波浪に相当するものであり、年平均有義波高よりもやや厳しくなる条件である。

数値計算に用いた底質条件は、現地調査結果および既存調査結果を参考に相沢下および島戸倉地点では粒径0.22mm、底質代表密度 2.65g/cm^3 で岩礁域を含む全計算領域にわたり一様に十分な層厚で砂が分布していると仮定した。

②計算結果

調査地点の数値計算結果のうち、海浜流ベクトル計算結果を図III-2-14に示す。



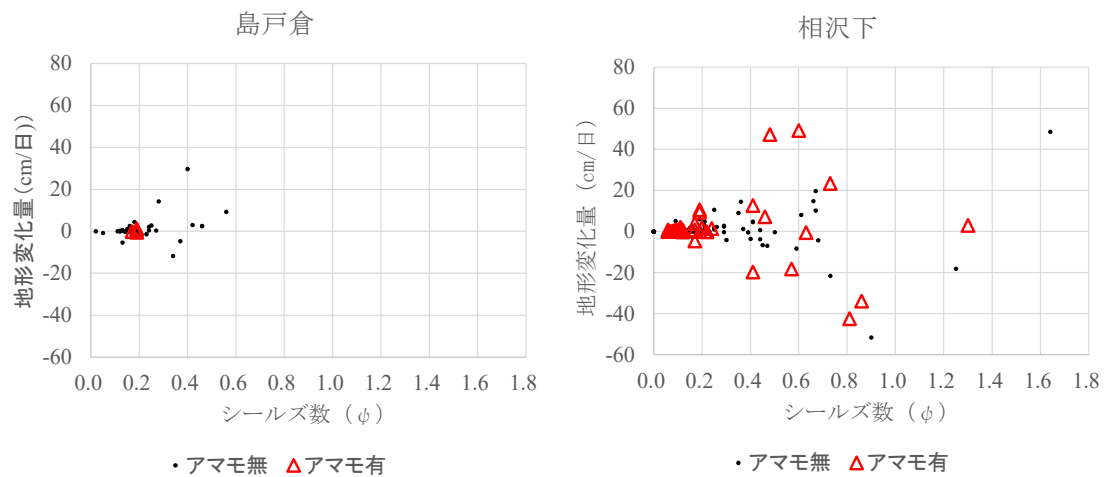
図III-2-14 海浜流ベクトル計算結果

相沢下地点では、砕波後の浅瀬部分で大きな流速が発生している。また、島戸倉地点では、湾口部で複雑な流れが発生している。この状況は垂下式流速計による測定結果と整合しており、モデルが現実を再現していると判断した。

(5) アマモ分布条件との比較

① アマモ分布域のシールズ数・地形変化量

未超過出現率90%、3回/月程度発生する波浪である $H_{1/3}=1.0\text{m}$ の波浪が作用した場合のシールズ数、地形変化量別のアマモ群落の存在範囲を図III-2-15に示す。

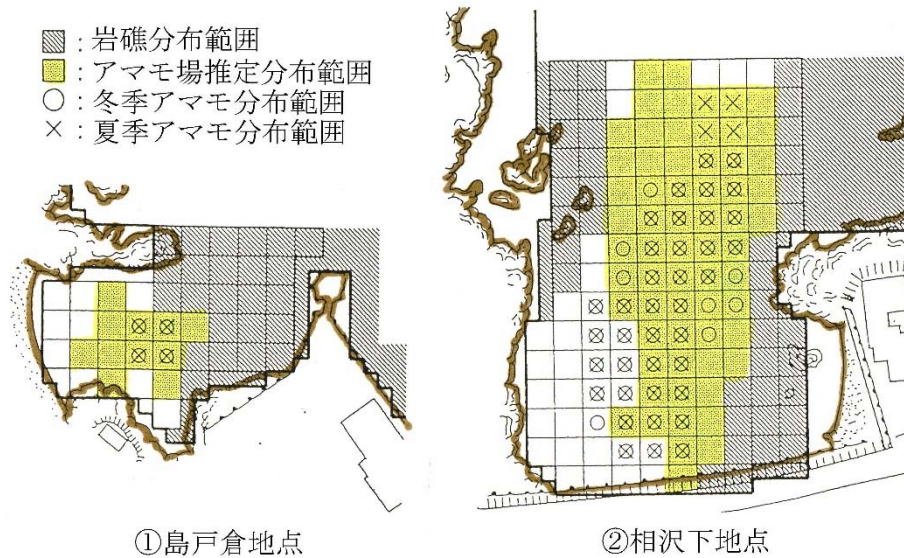


図III-2-15 シールズ数・地形変化量別アマモ分布プロット

② アマモ分布再現

竹岡海岸で得られ得たアマモ場の推定分布範囲である流速スカラー量 7cm/s 以下、シールズ数 0.6 以下、および地形変化量 $-0.5\sim 4.0\text{cm/日}$ というアマモ場推定分布条件を検討対象地点のアマモ場検討メッシュに当てはめ、アマモ分布の有無と比較した。なお、相沢下と島戸倉地点では、底質条件として明らかにアマモが分布し得ない転石および岩礁部分を除外した他に考慮しなかった。また、水深条件は、現地でのアマモ分布調査よりアマモ分布が確認された -5.5m を下限值とし

た。この条件で再現した島戸倉と相沢下地点のアマモ場推定分布範囲を図III-2-16に示す。



図III-2-16 島戸倉・相沢下のアマモ場推定分布範囲

島戸倉地点でアマモは全て推定範囲内に出現した。また、推定範囲11メッシュのうち、36.4%の範囲にアマモが分布していた。また、相沢下地点では、42メッシュの推定範囲のうち77.5%にアマモが分布していた（冬期分布域）。

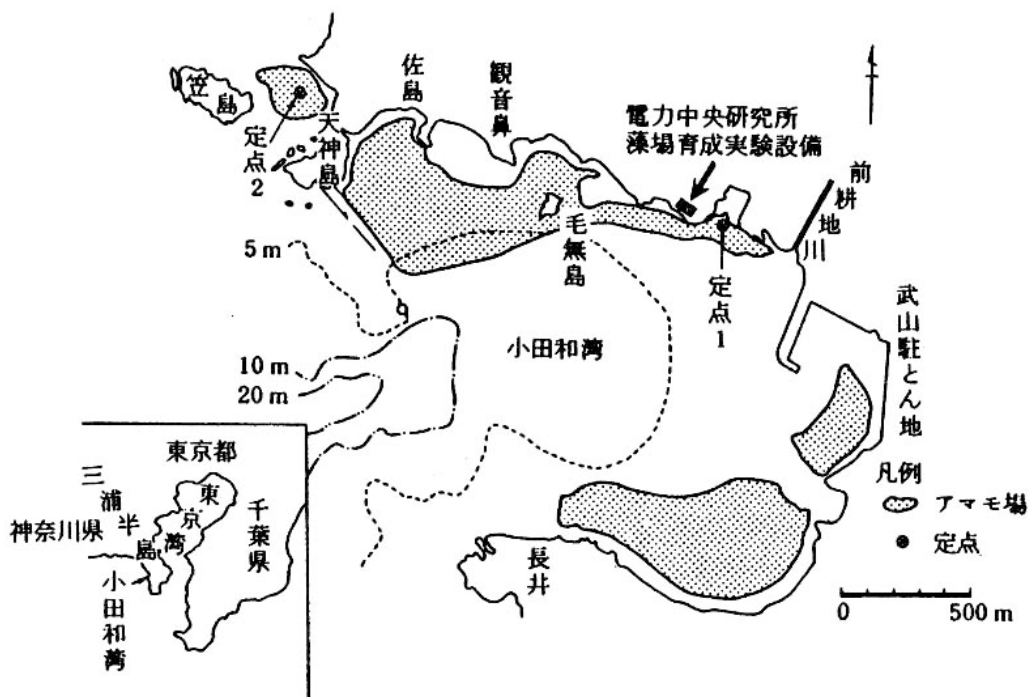
全アマモの73.8%は推定範囲内に分布していた。両地点で検討範囲は実際のアマモ場範囲を含む範囲を示しており、この推定条件が概ね妥当であると言える。なお、相沢下地点では、アマモの分布が見られた湾奥部左岸側（南側）部分にアマモの分布範囲が示されていない。この部分は、流況数値計算において20～30cm/s程度の比較的速い流れが認められたものの、携帯流速計による測定で約10cm/s以上の流速が実測されておらず、数値計算で現実が正確に再現されていない可能性がある。

III-2-3 神奈川県横須賀市小田和湾

1. アマモ場の情報

小田和湾地点のアマモ場に関する情報は川崎ら(1988)による既存の調査結果を用いた。この川崎ら(1988)による小田和湾地点のアマモ分布状況を図III-2-17に示す。

本地点のアマモ場は、アマモとタチアマモより構成されており、アマモ場分布範囲の底質が中央粒径0.14~0.44mm、分布水深が0.9~4.2mである。また、湾内の流速は5cm/s以下、砂面変動は1~2cm/月程度であるとされている。なお、川崎ら(1988)によれば、岩礁がある場所にはアラメ・カジメが分布していると報告されている。



図III-2-17 小田和湾のアマモ場分布状況 (川崎ら 1988)

2. 調査方法

(1) 計算メッシュ

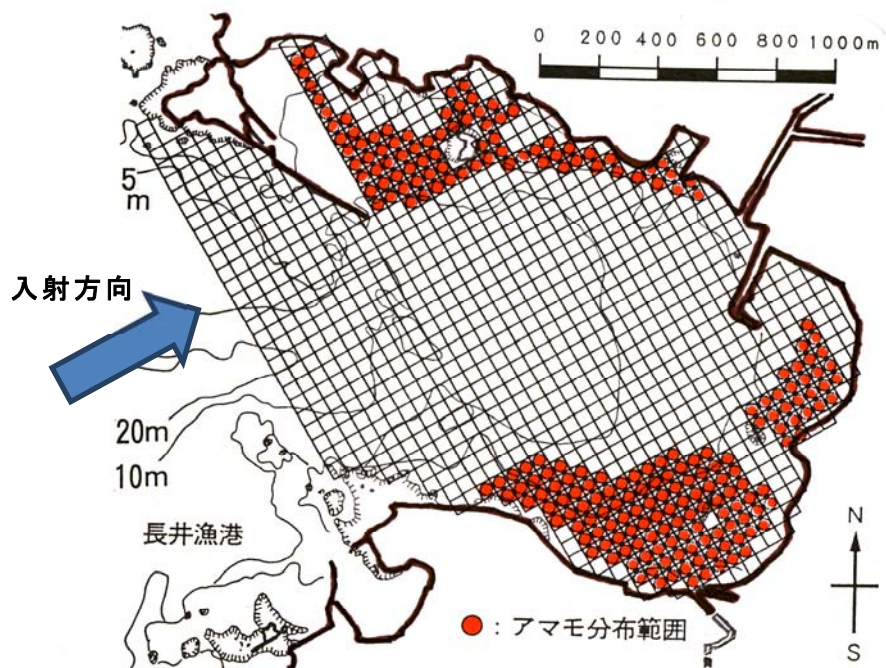
アマモ場分布条件の抽出には今まで述べた方法と同様に現地に数値計算を行うための計算格子（メッシュ）を設定し、アマモの分布状況もこのメッシュに当てはめた。その後、同一メッシュでアマモ分布や数値計算によって求めた外力条件を比較した。このために、小田和湾でも物理条件再現計算を行うための計算メッシュを設定した。

計算範囲は、**図III-2-18**に示すように海上保安庁発行の海図第92号および海底地形図第6363⁵号海図（W92、三崎港至湘南港）より水深情報を得て作成した。

図III-2-17のアマモ分布調査結果を用いて**図III-2-18**の7,000m×5,000m計算領域内に**図III-2-19**に示す計算メッシュを設定した。小田和湾におけるアマモ場検討メ



図III-2-18 小田和湾の三次元地形変化モデル計算範囲（海図より）



図III-2-19 小田和湾地区のアマモ分布検討メッシュ

メッシュの1メッシュあたりのサイズは50m×50mとした。

(2)底質条件

数値計算に用いた底質条件は、川崎ら(1988)による既存調査結果を参考に底質代表粒径0.35mm、底質代表密度 2.65g/cm^3 とした。調査範囲には岩礁も分布していたが、全計算領域にわたり一様に十分な層厚で砂が分布していると仮定した。

(3)数値計算モデル

アマモ分布と比較する物理条件については、竹岡海岸、島戸倉、相沢下地区と同様の3次元海浜変形予測モデルを用い、海浜流および底質移動に関するシミュレーションを行ない、海浜流ベクトル、シールズ数および地形変化量の平面分布の再現計算を行った。このモデルは、竹岡海岸、島戸倉および相沢下で用いたモデルと同じものである。

(4)波浪条件

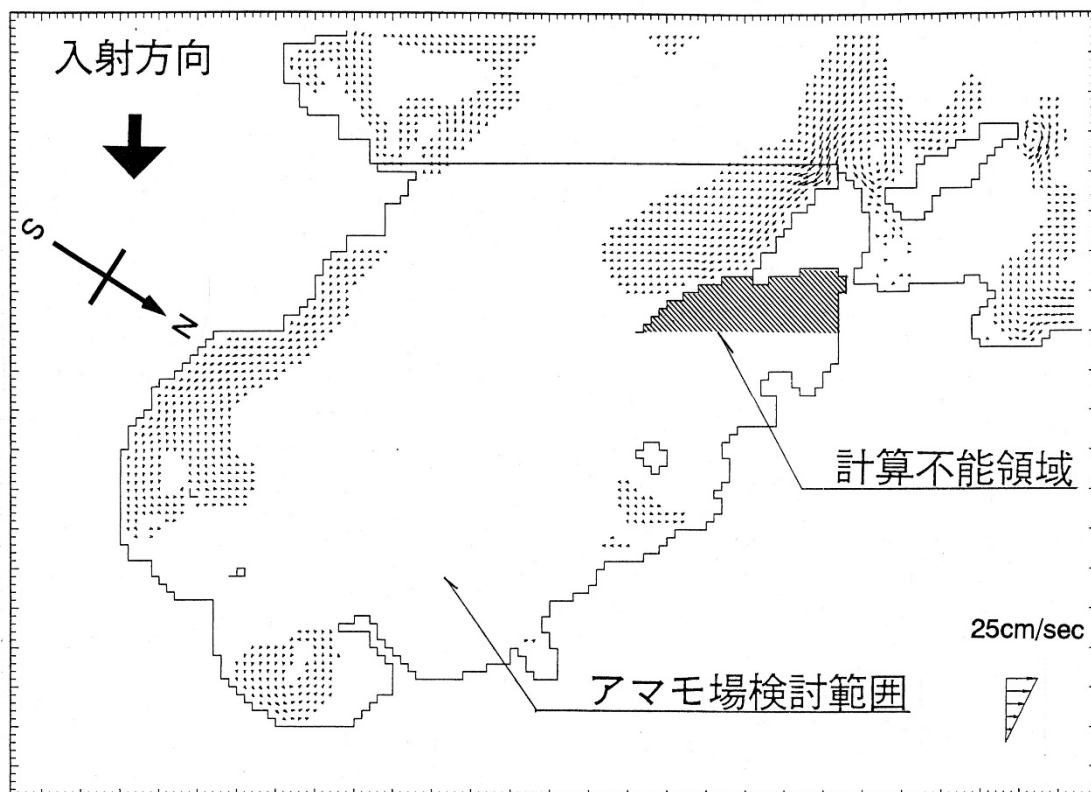
小田和湾地点では、再現計算を行う入力条件として、竹岡海岸、島戸倉、相沢下と同じように、その海域に通常発生し得る高波浪状態の波浪を用いた。

三浦半島西岸は、竹岡海岸地点と同様に北側および東側が遮蔽されていることから波浪条件が千葉県側に近いものと考え、これと同じ条件の波高1.0m、周期4sを用いた。ここで検討に用いた波の入射方向は、三浦気象観測所の1985年1月1日～1989年12月31日の期間中の地域気象観測資料による風況データより設定した。この結果、強風はSSWからWSW方向より吹いていることが明らかになったので、調査メッシュの汀線直角方向に対して0°の方向から入射するものとした。

3. 検討結果

(1) 数値計算結果

小田和湾の数値計算による流況ベクトル平面分布状況を図III-2-20に示す。モデ

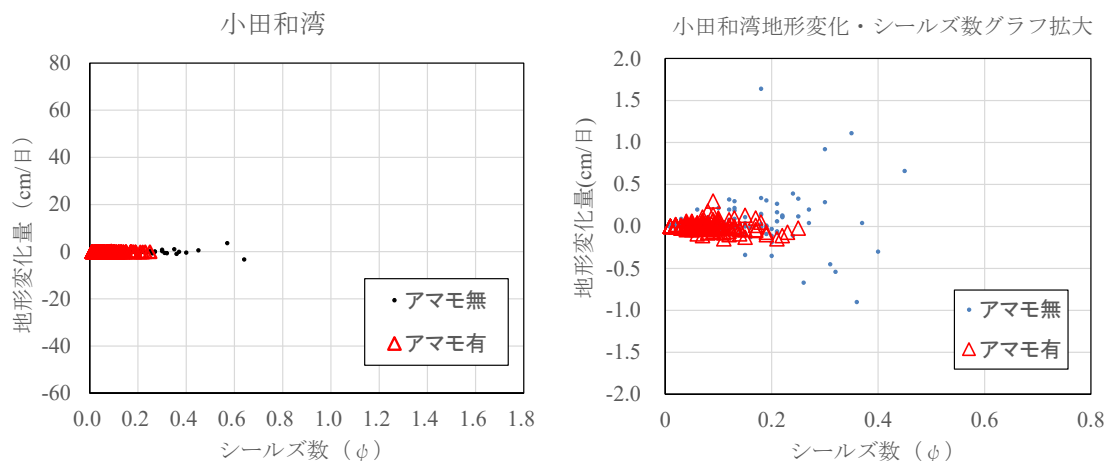


図III-2-20 小田和湾地点の海浜流ベクトル再現計算結果

ルの都合上、完全に入射方向を遮蔽している部分は再現計算ができなかった。

小田和湾地点は、入射方向側に半島や浅瀬があるため湾内で4cm/s以上の流速が発生しなかった。これは、川崎ら(1988)および丸山ら(1988)による湾内の実測値と整合している。

再現計算によって得られた各メッシュのシールズ数および地形変化量を用いて、アマモがあったメッシュおよびなかったメッシュの分布を図III-2-21に示す。なお、主な分布範囲については拡大図を付す。



図III-2-21 小田和湾のシールズ数と地形変化量別アマモ分布有無

小田和湾内は、今まで計算した千葉県富津市西岸に比べてシールズ数と地形変化量の変化範囲が小さい傾向にあった。

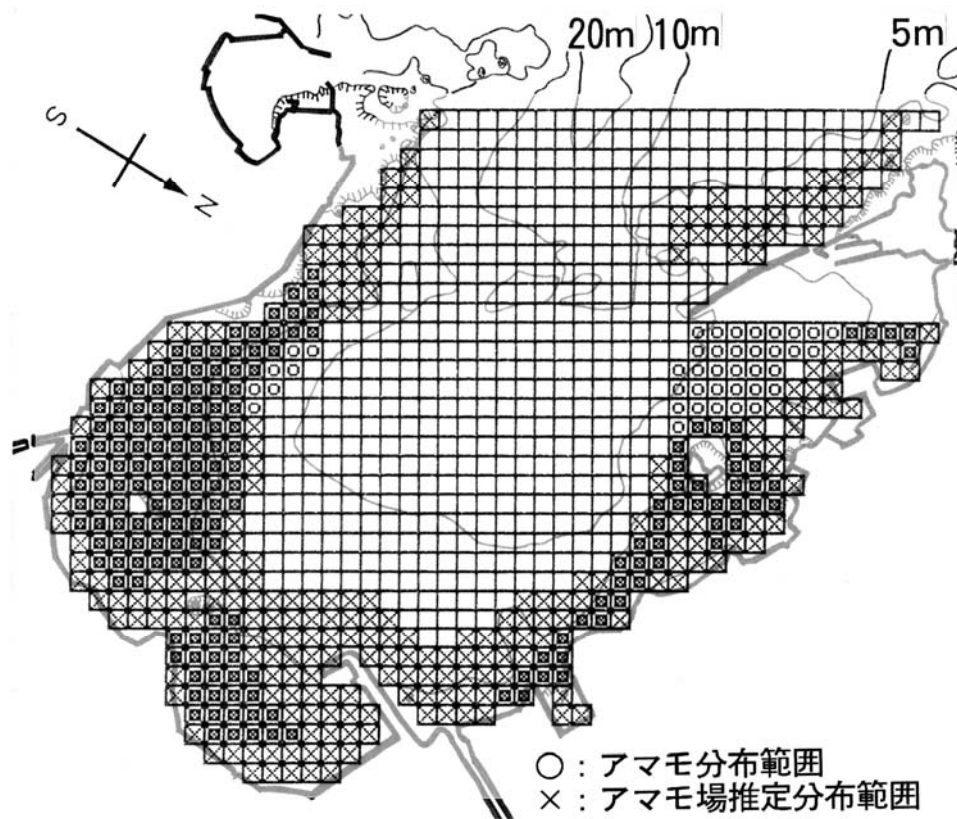
波高1.0mの条件でアマモ分布は、シールズ数が約0.3以下の底質移動形態が殆ど掃流移動の範囲、および底質が殆ど移動しない範囲に認められた。

(2)アマモ推定分布範囲のあてはめ

竹岡海岸での調査結果より設定したアマモの推定分布範囲である流速スカラー量7cm/s以下、シールズ数0.6以下、および地形変化量-0.5~4.0cm/日という分布条件を小田和湾の計算結果に適用させ、アマモ場の分布を再現した結果を図III-2-

22に示す。なお、小田和湾地点では底質条件を考慮しなかった。また、アマモ分布水深限界は、川崎ら(1988)より-4.2m (T.P.基準)とした。

小田和湾では、アマモ分布推定範囲425メッシュの42.4%にあたる180メッシュにアマモが分布し、またアマモ全体の82.6%が推定範囲内に存在していた。小田和湾において、数値計算結果より推定したアマモ分布範囲は、実際のアマモ分布範囲を包括する範囲を示していた。このことから、竹岡海岸で想定されたアマモ分布条件は概ね妥当であると考えられた。

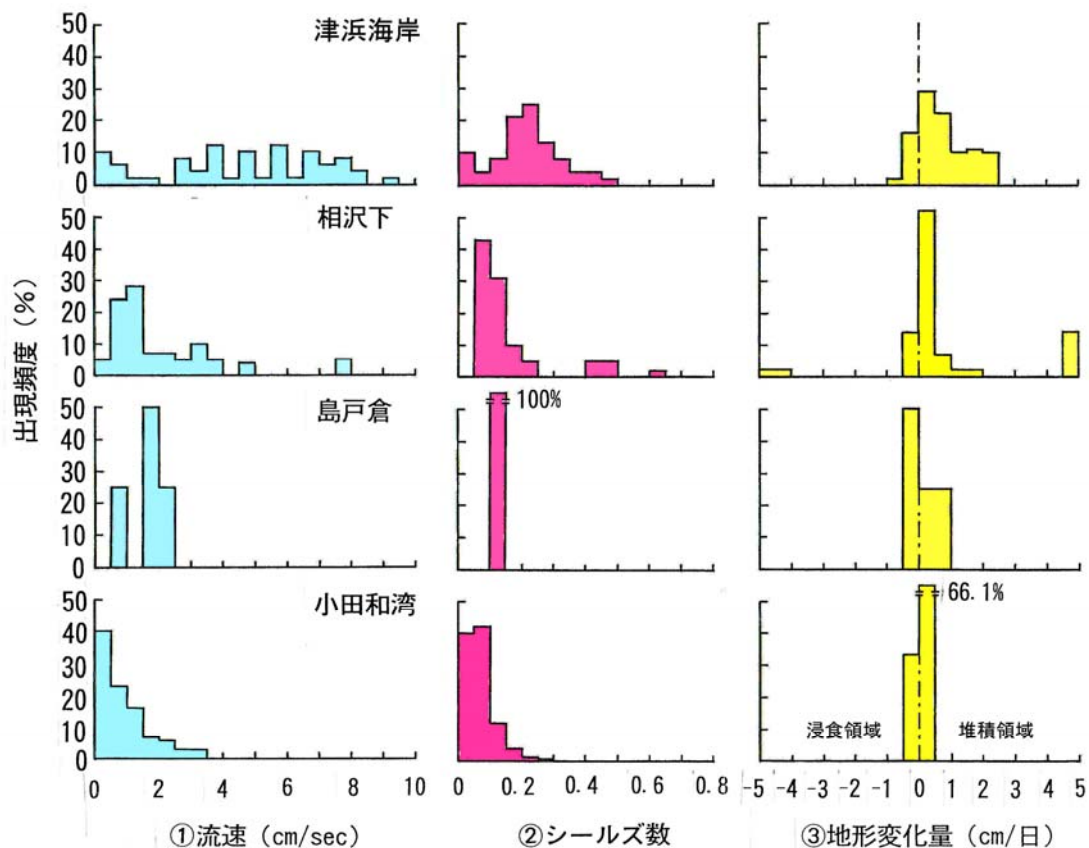


図III-2-22 小田和湾アマモ場推定範囲

III-2-4 考察

1. 検討対象地点の物理特性

今回の数値計算結果によって得られたアマモ分布範囲の物理条件より得られたヒストグラムを図III-2-23に示す。本図には、竹岡海岸(津浜海岸)で得られた結果も反映させた。今回検討した島戸倉、相沢下、および小田和湾のアマモ場分布域の物理条件は、竹岡海岸と比較して相対的に小さい傾向が認められた。このことにより、今回の検討範囲では、水深が適正である岩礁以外の全範囲がアマモ場分布範囲であることになった。換言すれば、水深が範囲内であれば、物理的条件が適正な場所でアマモが分布できない岩礁や転石以外の場所にアマモが生育可能であることを示している。



図III-2-23 各地点別のアマモ場における物理的外力条件分布頻度

竹岡海岸で得られた条件を基にしたアマモ場推定分布範囲では、検討対象とした竹岡海岸のアマモが広い物理的範囲に分布していたために、環境要因としてやや過大な範囲を示すことになってしまう。このため、各検討対象地点におけるアマモ分布地点の流速、シールズ数、および地形変化量の分布状況を検討した。

表III-2-1に波高1m、周期4sにおける漂砂の移動形態および侵食、堆積傾向別に調査対象メッシュのうちアマモが分布しているメッシュ数を表した。なお、シールズ数による漂砂の移動状態の区分は、清水ら(1990)に従い砂の侵食および堆積別にシールズ数が0.2以下の場合を掃流状態、0.2～0.5の場合が掃流状態、0.5以上の場合がシートフロー状態としている。

相沢下、島戸倉および小田和湾では、アマモ分布範囲の流速、シールズ数および地形変化量がほぼ同様な出現傾向にあった。一方、アマモ分布推定に用いた竹岡海岸地点では、その他の地点と異なり、アマモ分布地点の物理的条件として外力がやや大きい側に遍在している傾向が認められた。また、今回の検討対象地点

表III-2-1 各地点別の底質移動状態別アマモ分布メッシュ数

検討地点		相沢下		島戸倉		小田和湾		竹岡海岸	
		アマモ存在	全メッシュ	アマモ存在	全メッシュ	アマモ存在	全メッシュ	アマモ存在	全メッシュ
堆積領域	掃流状態	28	65	2	12	142	733	4	171
	浮遊状態	5	22	0	6	1	16	37	138
	シートフロー状態	1	8	0	1	0	1	3	110
侵食領域	掃流状態	7	19	2	20	74	197	4	31
	浮遊状態	1	10	0	5	4	16	8	63
	シートフロー状態	0	11	0	0	0	1	0	71
アマモ存在メッシュ数		42		4		221		56	
全メッシュ数		135		44		964		584	

のアマモ分布地点の物理量の範囲は、竹岡海岸での検討によるアマモ場分布範囲よりもさらに静穏な場所であることが明かとなった。

2. アマモの生態特性との関係

竹岡海岸で得られたアマモが分布し得る外力条件は、アマモの生態的特性より考慮すると「種子に対しては適度な堆積傾向、成長したアマモ場に対しては地下茎や芽が露出しない程度までの砂移動」であった。

しかし、今回の検討対象地点では、アマモは堆積傾向の範囲に分布していたものの、砂の移動状態が殆どの場合、掃流状態であった。即ち、竹岡海岸のアマモ場は、それ以外の検討対象地点よりも底質が不安定な場所にも分布が広がっていたということが特徴である。

竹岡海岸地点では、アマモ場が初夏期に分布を大きく広げるが、夏期以降、アマモの被度が小さくなり、さらに分布範囲も縮小する。これに対して、今回調査を行った相沢下、島戸倉地点では、アマモが周年かなりの密度で分布し、かつ分布範囲の変動が少ない。なお、川崎ら(1988)によれば、小田和湾地区においてもアマモは周年存在している。

以上のことから、アマモ群落は、その場所に未超過確率90%程度の通常作用する高波浪が作用する時、底質移動状況が浮遊状態までのアマモ群落が分布可能と考えられる範囲内でより底質状況が安定的な場所で周年群落を維持することが推察される。一方、底質が移動しやすい状態であれば、アマモ群落は、季節的消長を繰り返すことが推察される。したがって、アマモ群落を周年維持使用とする場合には、竹岡海岸の条件より得られた推定範囲よりもさらに静穏な状況を維持することが望ましいと考えられる。

III-3 結論

本研究では、既に港湾設計や計画で使用実績がある海浜変形シミュレーション結果を用いて通常の高波浪として発生し得る月に3回程度発生する波高1m、周期4sの条件におけるアマモ場の範囲を概略把握できることを示した。また、アマモの分布を漂砂移動形態および地形変化量より検討し、アマモの繁殖、生存条件が漂砂の移動と良く整合していることを明らかにした。

さらに、海浜変形シミュレーション結果を用いて得られたアマモ場の範囲を表す条件を複数のアマモ場に適用し、その妥当性を検討した。

数値計算や水深、底質によってアマモ場の分布範囲が把握できれば、アマモ場造成範囲を特定することができるだけでなく、現在アマモ場として不適な場所でも波浪などを制御することによってアマモ場が成立する可能性を示すものである。

竹岡海岸での調査により得られた波浪による底質安定性より評価したアマモ場推定範囲は、実海域に当てはめた場合、アマモ群落の分布範囲を概略的に把握できることを示した。アマモの分布を漂砂移動形態および地形変化量の検討し、アマモが周年分布する繁殖・生存条件は、漂砂の移動と良く整合していることを表した。さらに、水深と底質条件が適切であれば、この範囲内のどこでもアマモ場が成立し得ることが示された。しかし、この範囲内であっても、現実にはアマモ群落が存在していない場所もある。

物理的条件より抽出したアマモ群落成立範囲は、あくまでもアマモ群落が成立しうる外縁を示すものである。アマモの分布には、水深や底質が岸か砂泥かということ、河川による影響、漁業活動による影響などもある。そのため、アマモ場造成を行うに際しては、物理的範囲の中でその他の制限要因がないかどうかを考慮する必要がある。

第IV章 実際のアマモ場造成への適用

IV-1 はじめに

アマモ場の造成は、沿岸開発などにより現存するアマモ場が消滅する場合に近隣のアマモが生えていない場所や生育密度が低い場所で行われる。しかしながら、多くの場合、コストの関係上、波浪制御や地形改変までは行われない。したがって、アマモ場の造成は、アマモ場として不適当な場所で行われることがある。

アマモは、基本的に波浪・底質安定性・光量などの条件が適切であれば多くの場合、自然に群落を形成し、さらに条件の良い場所であれば濃密な群落に発達する。地形改変や波浪制御を伴わないアマモ場造成では、生息適地でない場所にアマモ場を造成する場合があります、その結果として生育状況が不良であったり、最悪の場合、アマモ場が形成されないことにもなる。

アマモ場造成の計画は、多くの場合、自治体などがコンサルタント設計委託し、施工業者が移植などの作業を行う。しかし、前述の通り、条件が不適当である場所にアマモ場造成を行った場合、結果が不良である可能性がある。さらに、移植結果が不良な場合には施工者側の瑕疵となる。そこで、施工を行う側としてもアマモ移設場所の条件が適切であるかどうかを施工に先立って評価を行い、問題がある場合には事業者側と協議して対応を協議する必要がある。

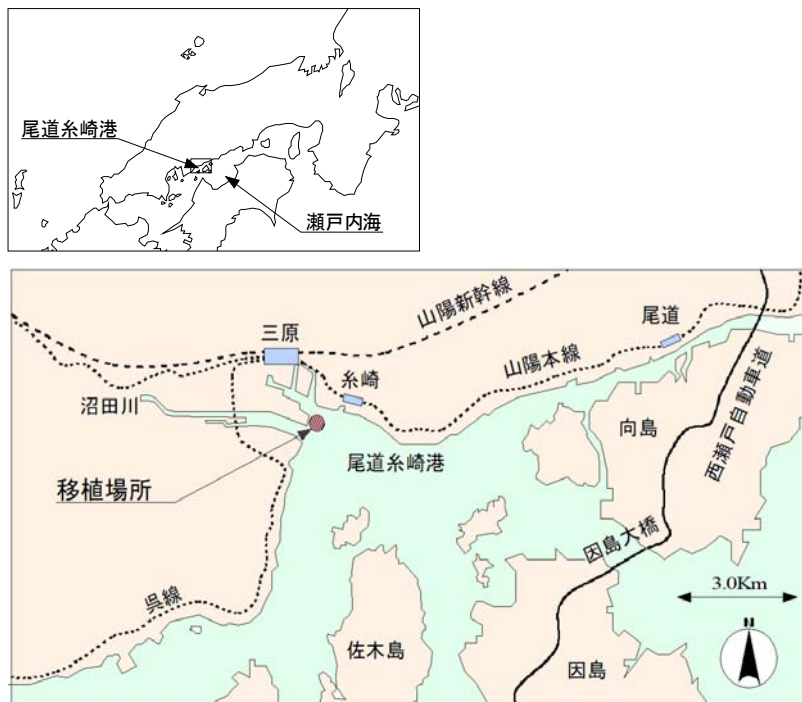
ここでは、1ha 以上の大規模なアマモ場造成の事例である広島県三原市の三原港地区地先の移植工事について、実際の施工にあたり移植先の条件を当該海域の通常発生する最大の外力である船舶航跡波を用い底質の安定性から評価した事例を示す。この工事はアマモ移植機械化施工を取り入れた大規模アマモ移植工事であったため、特に移植場所の評価については慎重に対応した。

IV-2 三原市地先におけるアマモ移植事業

1. 事業の概要

広島県三原市地先において埠頭用地、港湾関連用地、都市開発用地および緑地の整備を目的として合計 24.2ha の海面を埋め立て、さらに大型貨物船利用のために海底を浚渫する開発計画があった。この埋立および航路浚渫の対象地にはアマモ群落が成立していた。

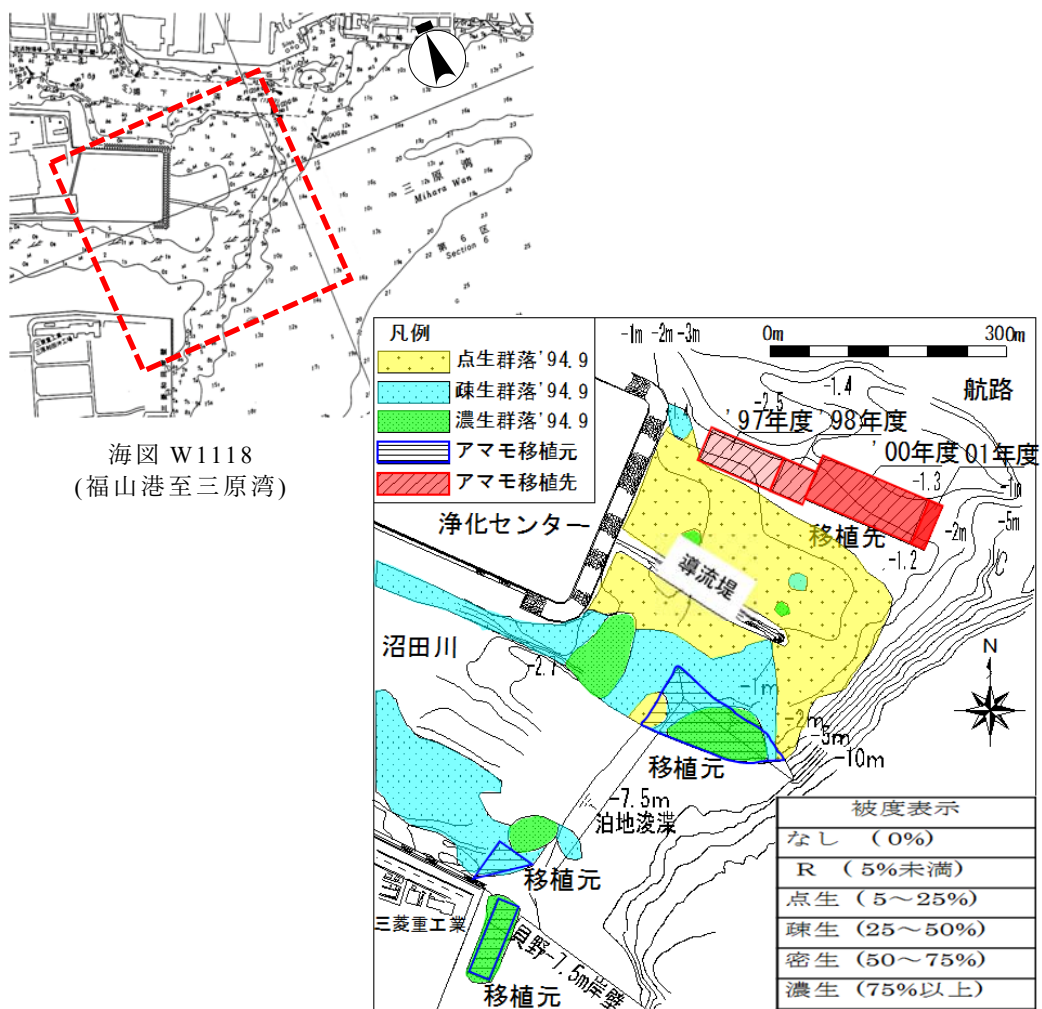
アマモの移植を伴う沿岸開発を行う場所は、広島県三原市（通称：帝人埋立地）地先海域である。三原港は、**図IV-2-1** に示すように瀬戸内海の北側に位置しているので北西の季節風が遮蔽されている。本海域は、瀬戸内海の中央部に位置しており、沖に多くの島が存在している。これらの島の存在が風を遮蔽するので、大きな風浪は発生しない。移設場所近傍には、瀬戸内海中央部の海上交通の重要



図IV-2-1 三原港（尾道糸崎港）アマモ移植場所位置図

拠点である三原港や糸崎港とその航路がある。特に、三原港からは頻繁に周辺の島々への交通船が発着している。

三原港周辺の詳細状況、1994年におけるアマモ分布状況、および1997年度～2001年度におけるアマモ移植場所を図IV-2-2に示す。当該地区の埋立免許には、工事によって失われるアマモ場について適切に対応するようという環境庁長官（当時）の意見が付記されていた。そこで、工事を行うに当たり、工事対象範囲に生育しているアマモを周辺の適地に移植することになった。また、事業者である広島県の検討により、ここに分布しているアマモ群落のうち、埋立範囲および



図IV-2-2 検討対象地点のアマモ分布と移植計画〔山本ら(2004)に加筆〕

浚渫区域にある群落である合計 14,000m² については、可能な限り移設するものとされていた。

なお、三原港地区のアマモ場移植地点付近には、昭和初期に貝野地区地先の浅瀬上に沼田川からの土砂が三原航路に流入することを防ぐことを目的とした導流堤の三原航路側に設置されている。この場所は、導流堤を建設してから導流堤の航路側に沼田川からの土砂の供給がなくなり、さらに時間経過により表面の土砂が流失してしまい、かつて砂に覆われて圧密により硬くなった粘土が露出したと考えられる場所である。このため、アマモ移植にあたっては、水深が適正であってもアマモを底質ごと移植することが求められていた。アマモを底質ごと移設することは、アマモと共に底生生物相も移植すること、および地盤高を少しでも嵩上げすることで光条件を有利にすることも目的であった。

移植対象地は、堅い粘土が海底に露出しており、アマモ生育に不相当と思われていた。そこで、アマモ移植にあたっては、アマモ地下茎を底質と共に採取して、これをそのまま移植地に配置する方法が採用された。

アマモ場造成を行うにあたっては、周辺海域におけるアマモ群落の分布状況を調査し、地形、水深、および底質を比較検討し、特に水深と底質状況に注目してアマモ場移植適地を選定することが一般的であった。

三原地先の事例でも移植対象地は、SS や潮流がアマモ生育に適しており、波浪条件が台風時でも有義波高が約 0.3m と小さいので波浪の影響が小さく、移植場所が適切であるとされていた。アマモ移植場所は、アマモの波・流れ・濁りといった物理的生育環境として適切であるが、底質として硬い粘土が露出した海底であったため移植先にアマモ生育に適した底質を供給し、そこに失われるアマモ株を配置することによりアマモ場が成立するようになると考えられた。そして、埋立

と浚渫により失われる 1.4ha のアマモ場を現在アマモが分布している場所の底質も含めて可能な限り移設することになった。

2. 移植計画

本格的な移植工事に先立ち、1998年3月に約50m×100m範囲の移植試験地で港湾の浚渫ならびに今後の埋立工事によって影響を受けるアマモ群落を群落が成立していた場所の底質ごとアマモ群落を採取し、これを移設する実験工事が行われた。これは、移植場所がアマモ群落を形成する上で相応しい場所であるかどうかを事前に確認することが目的である。

実際の移設に当たっては、工事の影響を受ける範囲に分布しているアマモ群落を底質ごとバケツなど採取し、移植場所に底質ごとアマモ群落を移動して、移植用装置を用いて海底に底質ごと配置するというものであった。

この方式は、それまで行われていたアマモの株を底質より取り出し、浮上防止のための粘土や竹串などを取り付けてダイバーにより1株ごと移植する方法と比較して大面積の移植に対応可能なこと、およびアマモ群落と底生生物群集をそのまま移設できる点で優れていると考えられた。

3. 移植場所の条件

当該地点における移植場所の選定には、事業者による事前調査および移植場所の条件設定（設計）が行われていた。この時点で広島県作成によるアマモ場移植場所の選定マニュアルが存在しており、本事業もこれに基づいて実施されたものと考えられる。しかし、この事業を行う頃には、各地のアマモ移植場所で移植後のアマモが消失するなどの現象が伝えられるようになっていた。

アマモ移植場所は、事業者によって条件設定（設計）が行われていた。移植場所に作用する外力は、潮流が最大0.2m/s程度、1年確率波が波向SSE、H₀

=0.35m、 $T_0=2.0s$ 、 $L_0=6.2m$ と推定されている。なお、港湾工事に用いる 30 年確率波は、波向 SSE、 $H_0=0.79m$ 、 $T_0=2.8s$ 、 $L_0=12.2m$ であった。

今回の事業の対象地点である瀬戸内海は、周辺に陸地や小島が存在している。ある場所に作用する波高には、一般に低気圧や台風などの気象による風速、持続時間および吹送距離を用いて発生する波浪を検討する SMB 法を用いる。三原港付近は瀬戸内海の北側に位置しているため、主に作用する風は南からのものになる。三原港付近の南側に大小の島が存在しているため、最大有効吹送距離は SSE 方向で 4.3km であった。このため、対象地区では、大きな波浪が発生しないと考えられていた。

この 1 年確率の波高が作用した場合の底質移動状況を評価した結果、現地の底質 ($d_{50}=0.140mm$) は C.D.L.+1.25m 以浅で移動すると評価された。これは、対象地区の平均水深 (M.W.L.) である C.D.L.+1.96m より深く、干潮時平均水深 (L.W.L.) である C.D.L.+0.55m より浅い。アマモは殆どが L.W.L. よりも深い場所に分布しているため、底質移動がアマモに影響がないことになる。このことから、当該海域の大きな外力条件は波浪より潮流と考えられており、移植部分は流速が小さく、地形変化の可能性が低いと判断されていた。

移植場所の底質には問題があり、事前の底質調査結果によりアマモの移植場所の底質粒度はシルト以下の成分が卓越し、COD も高いことが明らかになっていた。この状況はアマモの生育に適さないと考えられていたため、アマモ移植時に現在アマモが生育している場所の底質も同時に移設する方法を採用することになっていた。

IV-3 機械化施工によるアマモ移植

1. 機械化施工の特徴

三原港地区におけるアマモ移植は、移植を行う時期に台風による高波浪の影響が少ない秋季～冬季の限られた期間とされ、目標の移植面積を一定の時間内に施工することが要求されていた。また、移植先の底質は必ずしもアマモの生育に適したものでないと考えられていたため、アマモ移植においてはアマモを生育している底質ごと大型重機を用いて採取し、底質ごと移植地に移動する機械化施工を採用した。このアマモ移植機械化施工の特徴および効果は以下のように考えられている（中瀬・百瀬 2002）。

- ・従来の潜水士による移植工法に比べ、短期間に大規模な施工ができるため、限られた移植可能な時期を逃さず施工可能である。
- ・地下茎を底質ごと採取するため、アマモの葉体、成長点、地下茎に損傷を与えることが少ない。
- ・アマモの群落をそのまま移植するので、複数年級群を含む群落を移植することができる。このため、一度に全株が枯れることはない。
- ・アマモの地下茎が底質に根付いている状態で移植するため、移植直後でもアマモの流出防止と地下茎の定着力の保持が期待される。
- ・アマモを底質ごと採取するため、アマモ群落の底質が変化しない。
- ・底質と共に底生生物も同時に移植するため、底生生物を含むアマモ場の生物相に対する影響が小さいと考えられる。

2. 施工機械の概要

アマモ移植の機械化施工は、アマモの採取作業に用いる採取船団、移植作業を行う移植船団および移植場所までの運搬と移植を行う運搬船団により構成される（中瀬・百瀬 2002）。

(1)採取船団

アマモ採取船は、作業台船上に設置する 1.5m³ 積バックホウ、バックホウに取り付けた特殊バケット（図IV-3-1）および 25t 吊クローラクレーンにより構成される。使用する作業台船は、浅海域での採取作業を可能とするため、喫水の少ない大型の 1,000t 積作業台船（40m×15m×2.5m）を使用した。特殊バケットは、バックホウの先端に取り付け、2本の油圧シリンダを装備している。この油圧シリンダは、アマモを採取する枠であるインナーバケットをアマモが生えている海底の土砂内に押し込む際に用いる。バックホウは、インナーバケット地盤貫入時の反力と作業水深の確保のため、バケット容積 1.5m³ クラスを採用する。インナーバケットにアマモと底質を採取した状況を図IV-3-2に示す。

アマモの採取および運搬には、特殊バケットに取り付けるインナーバケットを用いる。インナーバケットは、移植時の作業を考慮して側枠と底板の二分割構造となっている。また、バケットの規模は、バックホウへの取り付けが可能かつ作業性の良い規模として奥行き 1.5m×幅 2.0m の 3.0m² とした。インナーバケットは、作業サイクルを考慮し、60 ユニット（全 180m² 相当）を準備する（中瀬・百瀬 2002）。これらのインナーバケットは、200t クラス台船（20m×9m×2m）2



図IV-3-1 特殊バケット（中瀬・百瀬 2002）



図IV-3-2 採取状況（中瀬・百瀬 2002）

隻および 250ps 引船 1 隻を使用して移植場所まで運搬する（中瀬・百瀬 2002）。

(2)移植船団

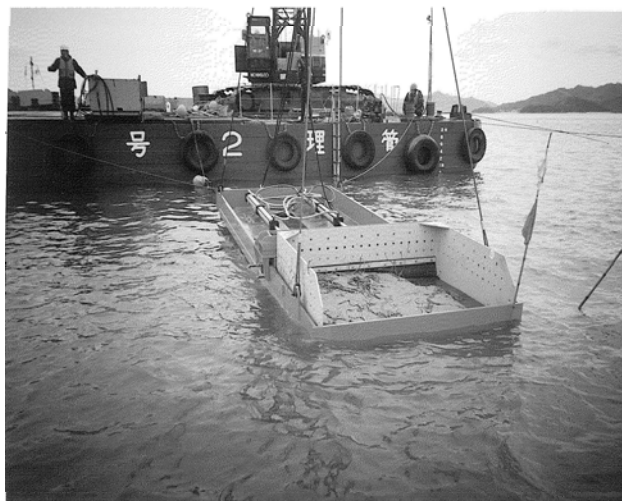
移植船は、25t 吊クレーン台船上に設置した油圧ユニットおよび移植装置により構成される。図IV-3-3 に示す移植装置は、フレームに油圧シリンダを 2 本配置し、インナーバケットの側枠を海底に押し出し、底板のみを引き抜くことで採取したアマモと底質をそのままの形で移植地海底に設置できる構造となっている（中瀬・百瀬 2002）。

3. 施工手順

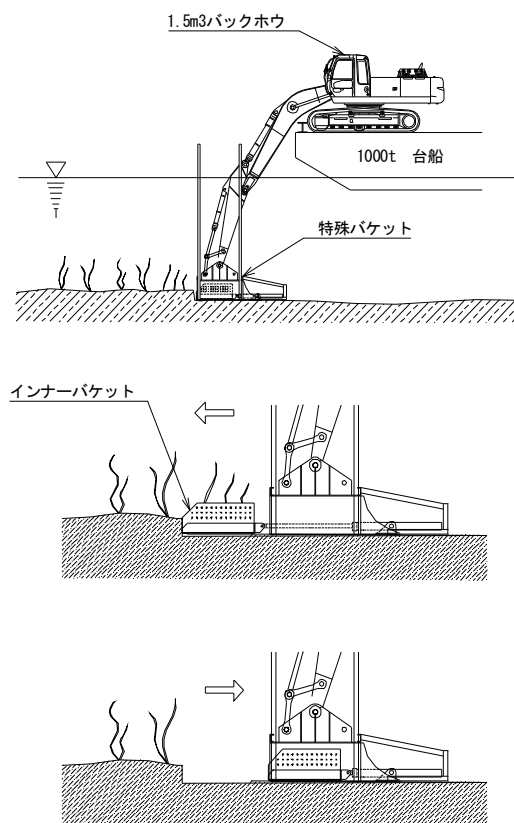
採取したアマモは、24 時間以内に移植を完了することが要求されていたため、採取作業および移植作業工程はそれぞれ並行作業で行う（中瀬・百瀬 2002）。

(1)採取作業

採取作業に先立ち、潜水士が台船を採取位置に誘導する。採取位置に台船が定位した後、特殊バケットを水底に下ろし、図IV-3-4 に示す要領で採取装置内のインナーバケットを底質内に油圧シリンダで押し出し、アマモの採取部分に貫入さ



図IV-3-3 アマモ移植装置（中瀬・百瀬 2002）



図IV-3-4 アマモ採取作業概念図（中瀬・百瀬 2002）

させる。採取する底質層厚は、アマモの地下茎が海底表面下 15cm 程度の場所にあるため、地下茎を傷つけないように 30cm とした。

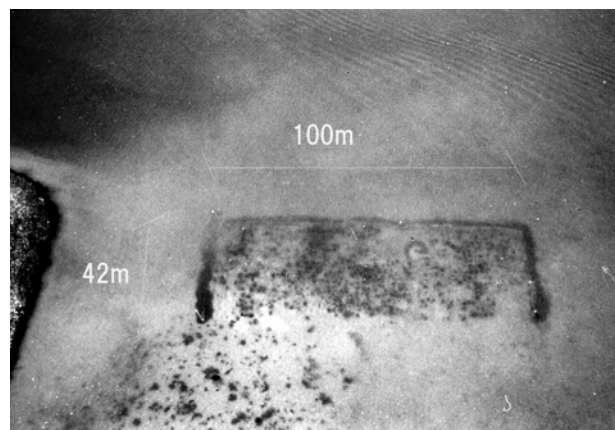
採取後、シリンダを引き戻して特殊バケット内にインナーバケットを回収し、運搬台船上に引き上げ、インナーバケットの交換を行う（中瀬・百瀬 2002）。採取したアマモ群落はインナーバケットごと移植地まで運搬される。運搬中は、アマモ葉体の乾燥防止のため、コンクリート養生マットで覆い、適時散水する。さらに、インナーバケット自体もビニルシートで覆い、乾燥による損傷を極力抑える配慮をする（中瀬・百瀬 2002）。

(2)移植作業

運搬台船によって運ばれたインナーバケットとアマモは、クレーンを使用し
図IV-3-3 に示した移植装置内にセットする。これを移植位置の海底に着底させ、
インナーバケットの底板を引き抜き、アマモを底質ごと海底に移植する。移植終
了した装置・インナーバケットは回収し、再びアマモを採取したインナーバケッ
トを装着し、この作業を繰り返す（中瀬・百瀬 2002）。

この工法を用いて、広島県三原市沖にて 1997 年度～2001 年度の 11 月～3 月に
D.L.-0.5m～-1.5m に分布するアマモ群落約 1.1ha を水深 D.L.-1.0m～-2.0m の
場所に厚さ約 30cm の移植元底質とともに移設した。移植場所周囲には、図IV-3-5
に示すように底質の流出を防止する潜堤を構築した。

前述の採取船 1 式と運搬船団、移植船団 1 式を用い、1 日当たりの施工量は約
70m²となった（中瀬・百瀬 2002）。



図IV-3-5 移植直後の状況（中瀬・百瀬 2002）

IV-4 船舶航跡波による移植場所の評価

IV-4-1 はじめに

瀬戸内海などの内海は、周辺に陸地や小島が存在するため風の吹送距離が短い。このため、風により発生する波浪を計算する方法である SMB 法で波浪解析すると、小さな波浪しか発生しないと評価されてしまう。しかし、瀬戸内海のように頻繁な船舶交通がある場合、これらの船舶による航跡波はしばしば台風時の波高より大きくなることも予想され、このような船舶による航跡波がアマモ場の成立に大きく影響することが考えられた。

三原港地区のアマモ移植場所も瀬戸内海海上交通の要衝である三原航路至近に位置しており、移植地点でも交通船の船舶航跡波が懸念された。船舶航跡波は、天候にかかわらず毎日発生する。このため、アマモは移植直後より船舶航跡波の影響を受けることになり、施工終了後のみならず、施工途上における移植アマモ場の維持についても懸念された。

事前の計画において、施工対象場所に特有の外力条件である船舶航跡波が及ぼす底質安定性に関する評価は行われていなかった。事前検討における潮流による底質安定性の評価は、平均流であり加速度の大きな波浪によるものとは異なる。そこで、恒常的に発生する船舶航跡波を通常の波浪と同様に考えて、波浪による底質安定性の評価を行った。

通常、船舶航跡波は、孤立波であるため、底質を移動させるほど頻繁に作用することは稀であると考えられていた。しかし、本地点は、瀬戸内海の離島間交通の拠点であるため船舶が連続して航行し、これに伴い船舶航跡波も継続的に作用する。このことから、検討対象地点では船舶航跡波を通常の波浪と同等と考えた。しかし、船舶航跡波を波浪条件としてアマモ分布を検討した事例は当時なかった。

そこで、アマモの移植場所に指定された場所に作用する船舶航跡波による外力条件を評価し、移植場所の底質安定性がアマモの移植場所としての妥当性を評価した。このために、アマモ試験地点至近に作用する船舶航跡波を目視観察すると共に設置型波高・流速計により連続計測した。次に、計測された波・流れの条件を用いて底質の移動状況を表すパラメータであるシールズ数（ ϕ ）の平面分布を算出した。これにより、現状のアマモ分布場所とアマモ移植地点の底質の安定性を評価し、これまでの本研究で得られた「その海域における通常の高波浪時に底質がシートフロー状態にならないこと」というアマモ場分布条件が船舶航跡波でも成立することを検証すると共に移植地点の妥当性の評価を行った。

IV-4-2 調査目的

本地点におけるアマモ場調査の目的は、第一義的に事業者側から与えられたアマモ移植場所がアマモの生育条件に照らして適正なものであるかどうかについて、アマモ移植を施工する側として検証しておくことにあった。さらに、底質の安定性を評価する上での波浪条件を船舶航跡波とした場合、これを予測できるかどうかを確認すること、およびアマモ移植工法のもう一つのメリットとされている生物相の移植の可能性を検証した。

1. アマモ分布条件の抽出

アマモの分布は、既に述べてきたように沖側（深い側）の分布限界が光条件で規定され、岸側（浅い側）分布限界がその場所に通常作用する大きな外力による底質安定性で決定づけられると考えた。この底質安定性は、底面せん断力に対する底質の中央粒径と比重による移動抵抗との比を表すシールズ数により評価されることが竹岡海岸など複数地点での調査結果および計算結果より明らかになって

いる。この底質安定性は、底面せん断力と底質の中央粒径、比重より算出され、底質移動状況を表現するパラメータであるシールズ数によって判断可能である。

三原港地区での調査は、今までに確認してきたアマモ分布に関わる外力条件が実際に移植工事を行う場所において満たされているかどうかを確認することが第一の目的である。これは、施工技術が適正なものであっても、移植先がアマモ生育に不適切であればアマモは活着しない。また、現地の条件がはっきりしていなければ、万一移植したアマモ群落に不具合が生じた場合、その原因を追求することが困難になり、かつ対応策を講ずることもできないからである。

当該海域のアマモ場造成予定地点は海底に固い粘土が露出しているため、アマモ移植に当たっては周辺のアマモ場のアマモを底質ごと移植することが計画されている。このため、アマモと共に移植される底質が検討範囲全体に分布すると仮定してシールズ数の分布を計算し、現存するアマモ場の分布と比較し、当該海域における外力から見たアマモ分布条件を抽出する。そして、この結果よりアマモ移植地点の妥当性を評価した。

2. 航跡波による波浪条件の抽出

シールズ数の算出には、第一に現地の波浪条件を明らかにする必要がある。従来、台風などの気象によって発生する波浪がアマモ場の分布に大きな影響を及ぼしてきたと考えられている。しかし、三原市沿岸海域は、瀬戸内海にあって多くの島や陸地に囲まれた場所であり、吹送距離が小さく、このため台風時でも高波浪が発生しないと考えられる。一方、三原港は、瀬戸内海海上交通の要衝であったため、当該地点で台風などによる高波浪よりも毎日運行するフェリーボートや高速船により発生する航跡波の方がより大きな外力であることが予想された。

このような海域では、アマモ場の分布を決定づける「その場所に通常発生する高波浪条件」が毎日運行する高速艇やフェリーボートの航行による航跡波である

と考えられた。現状に分布しているアマモ群落も毎日の船舶航跡波の影響を受けていることになる。

そこで、今まで検討してきたアマモ場分布に関わる波浪・海浜流・シールズ数の条件が船舶航跡波であっても同様な考え方でアマモ場の分布を評価できるかどうかについて検討を行うことにした。

このため、船舶の航行する航路付近に波高計付き流速計を設置し、同時に実際の船舶の運航状況を観測することで航跡波の発生条件を明らかにした。具体的には、個別に特定した船舶の移動状況と計測器による波浪観測結果を照合して、観測された高波浪が船舶航跡波によるものであることを確認することにした。

実際に、当該海域では、恒常的に船舶の交通があり、アマモにとって海上交通による船舶の航跡波の影響が勝ることが考えられる。実際に移植対象地を見てみると、船舶通過後に明らかに事前に評価した年最大有義波高（約 30cm）よりも大きいと見られる波浪が発生していた。

移植対象地は、三原港や糸崎港から瀬戸内海各地へ向かう航路に隣接している。当時瀬戸内海を横断する「しまなみ海道」（西瀬戸自動車道路）はまだ完成しておらず、朝夕のラッシュ時に2分～5分おきに各種船舶が往復する状況であった。このため、船舶により発生する波浪（船舶航跡波）が連続的に既存アマモ場やアマモ移植場所に作用する可能性があった。

シールズ数の算出を行うために航跡波を実測し、さらにこれを数値計算により平面的分布の再現計算を行った事例はなかった。繰り返し述べてきたように、当該地点では、台風などによる高波浪よりも毎日運行されるフェリーボートや高速艇により発生する航跡波が大きな外力であることが予想された。そこで、三原港の航路付近に波高計付き流速計を設置して航跡波を実測すると共に、同時に実際の船舶の運航状態を観測することにより航跡波の状況を明らかにした。この結果

は、数値計算結果との比較としても用い、航跡波の存在下におけるアマモ分布条件の定量化を試みると共に、移植適地の評価を行うことにした。

第II章では、アマモの分布を決定づける物理的パラメータとしてシールズ数と並んでその場所の侵食堆積を表す地形変化量を採用した。三原港地区でも当然侵食堆積を考慮すべきなので、アマモ試験移植直前に地形変動を直接測定可能な光電子砂面系を配置した。砂面系が日常的に発生する高波浪作用時に変化を記録した場合には、侵食堆積を表す地形変化量を検討に加えることにした。

3. 底質・底生生物分布

底質・底生生物調査は、アマモの移植と同時に底生生物相も移植できるかどうか検証することが目的であるが、同時に事前調査で行われた底質調査についての補足調査を行うこともその目的とした。後者の目的のため、現状でアマモが分布している場所、ならびに移植予定地点および周辺の海底の粒度組成を中心とする底質調査を行った。また、アマモ移植時に底質と共に移植される底生生物についても分析を行い、底生生物相もアマモ同様に移植されるかについても調査した。

IV-4-3 現地調査

1. 調査方法

1998年3月23日～30日にアマモ移植区域周辺に波高計つき流速計、砂面計を配置して波高などのデータを取得した。また、併せて潜水士が底質サンプルを採取して、各種底質項目について分析を行った。

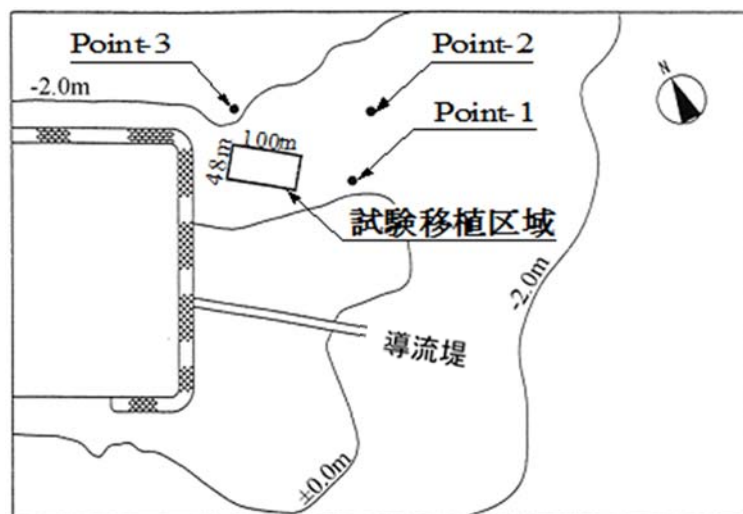
1998年3月24日8:30～14:00の間にアマモ移植試験施工予定区域至近の航路の船舶航行状況および航跡波発生状況を目視観察した。

(1) 波浪潮流および船舶航行・航跡波調査

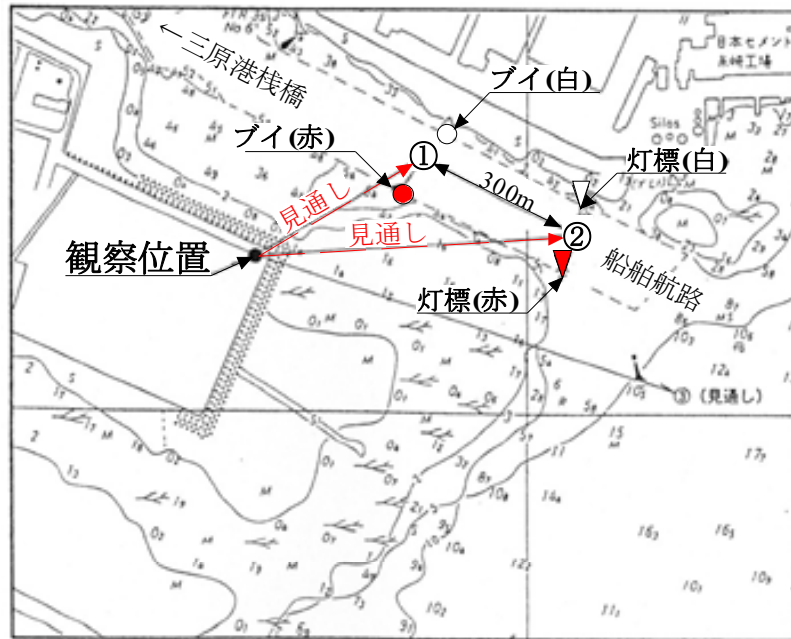
事前の検討では、移植場所に作用する1年確率波が $H_{1/3}=0.35\text{m}$ と推定されて

いたが、現地踏査を行ったところ、船舶通行時に明らかにこれらよりも大きな波浪が発生していることを目視した。この実態をより正確に把握するために、1998年3月23日～30日に図IV-4-1に示すアマモ移植区域周辺3地点に水圧センサー付電磁流向流速計（ACM-4M および ACM-8M）を設置し、測定間隔 0.5 秒で波高と流速の連続測定を行った。

計測機の設置水深は、Point-1: D.L.-0.2m、Point-2: D.L.-1.2m、Point-3: D.L.-2.3m であった。Point-1 には光電式砂面計を設置し、波高と流速測定と同時に底質の移動状況も測定した。また、計測機による波浪・流速の測定と比較するために、測定期間内の1998年3月24日8:30～14:00にアマモ移植試験施工予定区域至近の航路の船舶航行状況および航跡波発生状況を観察した。航跡波の観察は、図IV-4-2に示す観察位置より航路ブイ間（①）および航路浮標間（②）を通過する船舶種類、船名、および各通過時刻の記録、および航跡波が観察位置に到達した時刻の記録によった。航路ブイと航路浮標間の距離は300mであるため、ブイと航路の通過時刻を記録することで船舶の速度が算出可能である。



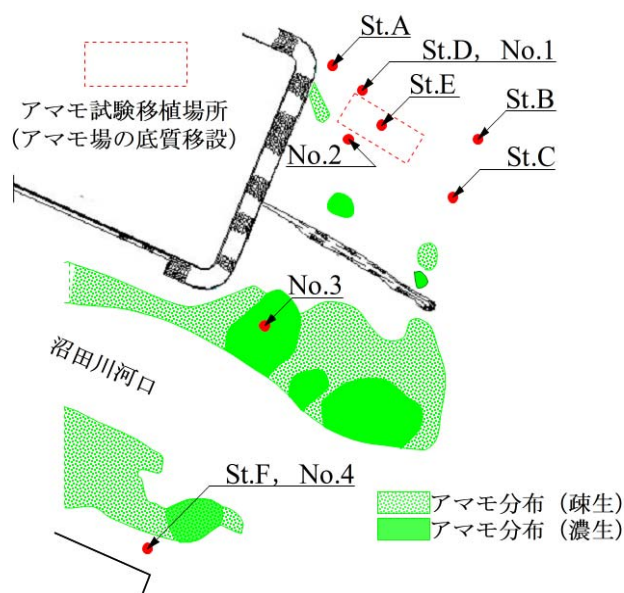
図IV-4-1 計測機配置場所



図IV-4-2 航跡波目視調査位置

(2)底質および底生生物調査

1998年3月30日および施工期間中に図IV-4-3に示す調査地点で潜水士が海底表層の底質を口径0.12m²の広口瓶にて採取し、ふるい分けによる粒度組成分析〔JIS A1204(1990)〕と比重分析〔JIS A1202(1990)〕を行った。



図IV-4-3 底質およびベントス調査地点

表IV-4-1 各調査地点での分析項目

採取日		分析項目		備考
3月30日	施工中	底質	生物	
A		○	○	
B		○		
C		○	○	
D	No.1	○	○	
	No.2	○		
	No.3	○		
E		○	○	試験移植場所内
F	No.4	○	○	

さらに、1mm メッシュふるいを通過しないマクロベントスの出現種別の湿重量計測および個体数計数を行った。

それぞれの地点で実施した調査分析項目を表IV-4-1に示す。これらのうち、E地点は、アマモ移植元より底質とともにアマモが試験移植されていた。

2. 流速および波浪データ解析方法

(1) 波高・流速

観測した波浪および潮流のデータは1時間毎に解析処理を行った。今回観測された波浪は、殆どが船舶航跡波と考えられた。波浪データは水圧として記録されるが、船舶航跡波は非定常性が強いので、水圧データを水位に変換せずにそのまま評価した。ただし、波高、周期など統計値の算出については、観測されたデータから潮位とノイズを除去した後、ゼロアップクロス法により統計処理を行ない、波高については伝達関数を用いて水圧波高を波高に変換した。

流速データは、観測された流速のx、y方向のデータを定常成分と非定常成分に分離し、それぞれについてx、y方向成分を合成して定常流速および非定常流速を求めた。波向は、非定常流速データより最大流速変動を求め、この時の波向を算

定した。ただし、波向算定の対象を比較的波高の大きい航跡波に限定するため、最大波高 0.20m 以下の波について波向を除去した。

砂面変動は砂面計を用いて計測した。砂面計は、底質に変動があると 2.5cm 間隔で感知するようになっている。観測されたデータを時系列グラフに表記し、観測期間中における地盤高変動の大きさを求めた。

(2)海底地形と再現計算メッシュ

現状におけるアマモ分布と比較するため、アマモが現在分布している場所および移植試験地、移植予定地の波高・流速・シールズ数の分布を数値計算により求めた。再現計算に用いた水深データは、三原港付近の海図および工事用海底地形図より作成した。計算領域は、図IV-4-4に示す沿岸 800m 岸沖 800m の区域とし、計算メッシュ間隔を 10m とした。アマモ移植工事時にアマモと共に層厚 30cm でアマモ採取場所の海底土砂も移設するので、移植先の水深は 0.3m 浅くなる。この盛土による嵩上げ条件を再現するため、アマモ移植先に相当する領域は水深データに 0.3m を加えた。



図IV-4-4 再現計算範囲および計算メッシュ

(3) エネルギー平衡方程式の評価

現地における広範囲の底質安定性を評価する場合には、その計算領域内での波高分布を求める。この波高分布の再現計算には、通常はエネルギー平衡方程式を用いている。ここで、対象となる船舶航跡波は常の波浪と異なり非定常性が強い波であるため、エネルギー平衡方程式で計算することの妥当性を検証しなければならない。そのため、エネルギー平衡方程式で算出した波浪場によるシールズ数と実際観測された流速データにより算出したシールズ数とを比較し、両者の整合性を確認することによりエネルギー平衡方程式を用いて航跡波やシールズ数を評価することの妥当性を検討した。具体的には、観測データを解析して航跡波の諸元（波高、周期、波向）、潮流の諸元（流速、流向）および潮位を算定した。この潮位より計算に用いる水深データを調整した。

計測機配置場所の Point-1 における沖波 (H_0' : 十分に水深が大きい場所における仮想の入射波高、換算沖波) を浅水係数・屈折係数より換算した。これを入力条件としてエネルギー平衡方程式で波高分布の再現計算を行なった。これに続いて再現計算領域内の観測地点 Point-1 相当地点の波高を抽出し、沖波換算した波高を入力条件にして、再度、エネルギー平衡方程式で計算領域内の波高分布を再現計算した。

(4) シールズ数の評価

観測データによる条件および再現計算による条件でシールズ数の平面分布を計算し、それぞれの計算結果より観測地点 (Point-1~Point-3) におけるシールズ数を抽出して両者の出現傾向を比較し、両者の整合性を評価した。

このシールズ数の計算については、波・流れ共存場として田中・Sana(1996)の理論に基づいて底面せん断力を求め、シールズ数を算出した。なお、波動流速は船舶航跡波を想定しているため非定常流の最大流速を用い、底質はアマモ採取場

所の底質分析より求めた平均中央粒径 $d_{50}=0.180\text{mm}$ 、比重 2.499 の条件を用いて計算することとした。

現地におけるシールズ数は、波浪による流れである非定常流と潮流による定常流の影響を受ける。入射波の諸元が等しい場合、水深が小さく（浅く）なるほど底面波動流速が大きくなる。このため、波浪によるシールズ数は潮位（=水深）に大きく影響されることになる。一方、潮流によるシールズ数は、一般に大潮の引き潮、上げ潮時に大きな値を示す。

これらのことから、シールズ数が $\phi > 0.5 \sim 0.6$ の大きな値をとると考えられる次に示す2つのケースについて計算を行った。

- 1) 観測期間中に最も潮位が下がったときの値を入力条件とする「潮位が支配的なケース」。水深が小さい（浅い）分、波浪の力が海底に伝わりやすい。
- 2) 観測期間中に最も潮流が大きかった時の値を入力条件とする「潮流が支配的なケース」。航跡波よりも波高は小さいが、潮流による定常的な流速が作用する。

(5) アマモ群落分布とシールズ数との比較

船舶航跡波の再現計算がエネルギー平衡方程式により算出可能であり、計算によって得られたシールズ数と現地観測結果を用いて算出したシールズ数が整合していた場合には、各ケースでシールズ数の平面分布の再現計算を行い、アマモの分布との比較を行った。比較に当たっては、既存のアマモ群落分布の調査結果のアマモ群落が「疎生」と「濃生」の部分を採用し、これらの分布と数値計算結果を比較した。

IV-4-4 観測結果

1. 船舶通航状況

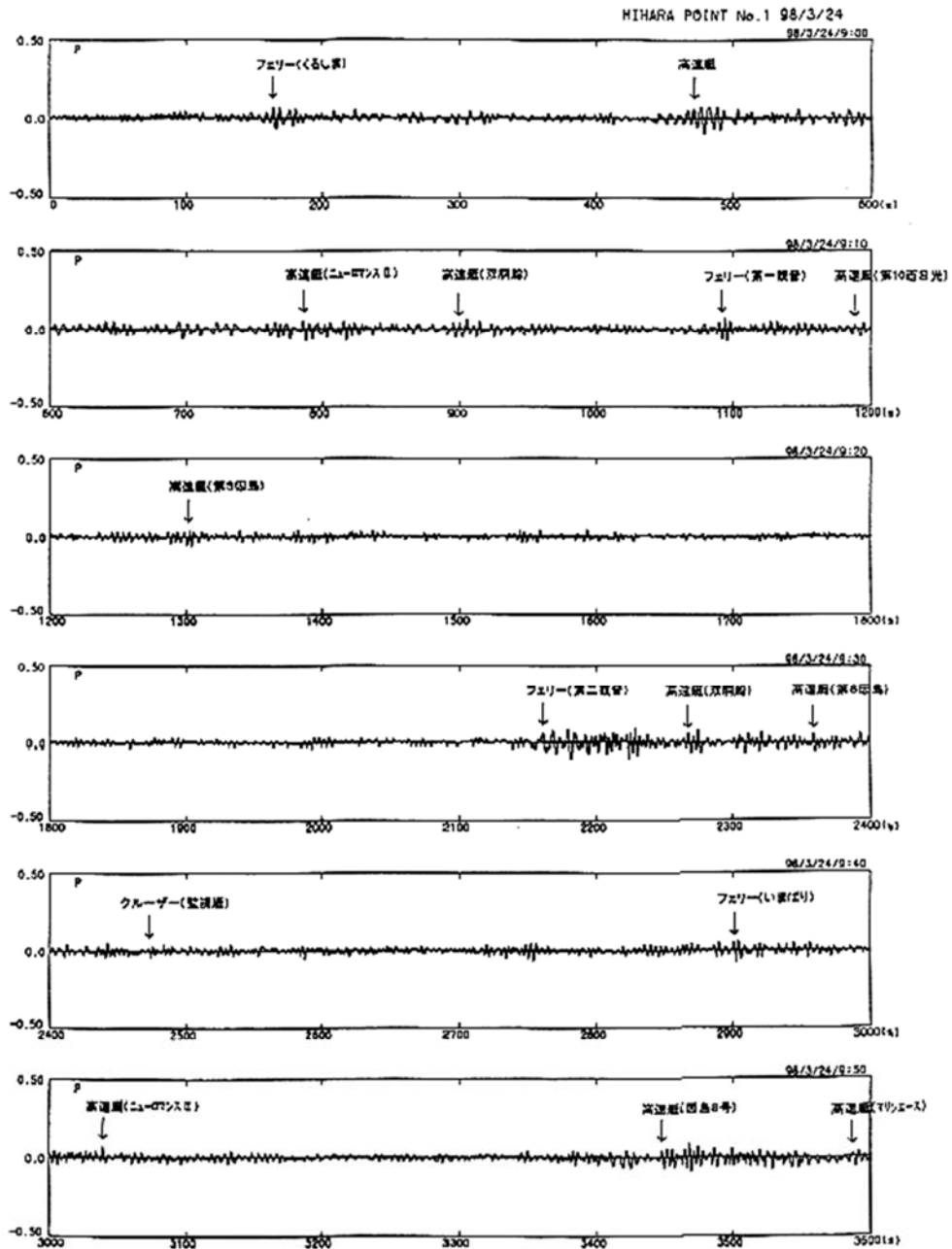
三原港を入出港する船舶通行状況観察結果を表IV-4-2に示す。9時台には入港8

表IV-4-2 船舶運航観察結果（一部）

船種	入出	通過時刻			波浪来遊 時間	備考
		point-1	point-2	point-3		
高速艇	出港	9:10:14	9:10:44	9:11:06	9:12:57	ニューロマンⅡ
高速艇	入港	9:12:30	9:12:08	9:11:50	9:15:00	双鯨艇
フェリー	出港	9:13:48	9:14:19	9:16:21	9:17:16	第一観音
高速艇	入港	9:18:22	9:17:49	9:17:21	9:20:01	第10西日光
高速艇	出港	9:21:03	9:21:40	9:22:15	9:22:00	第三因島
漁船	出港	9:27:35	9:28:19	9:29:10	9:29:28	Pt2インコース通過
フェリー	入港	9:34:07	9:33:00	9:31:48	9:34:22	第二観音
高速艇	出港	9:36:55	9:36:20	9:36:05	9:37:50	双鯨艇
高速艇	入港	9:36:55	9:36:20	9:36:05	9:39:00	第六因島
高速艇	出港	9:36:13	9:36:38	9:37:22	9:39:00	
ク+台船	出港	9:38:25	9:42:21			右折→停止
クルザー	出港	9:38:53	9:39:26	9:40:05	9:40:40	県監視船
プレジャーボート	出港	9:39:34	9:39:51	9:40:32		
フェリー	入港	9:44:30	9:43:31	9:40:51	9:46:49	いまばり
高速艇	入港	9:48:48	9:48:22	9:47:56	9:50:14	ニューロマンⅡ
高速艇	出港	9:56:01	9:56:28	9:57:20	9:57:36	因島8号
高速艇	入港	9:57:47	9:56:46	9:56:17	9:59:16	マリエース
クルザー	入港	9:58:13	9:58:51		10:00:00	県監視船
フェリー	出港	10:03:26	10:04:05	10:04:56	10:03:15	ニューいまばり
高速艇	出港	10:04:25	10:04:49	10:05:13	10:06:09	
高速艇	出港	10:06:16	10:06:49	10:07:19	10:08:10	おおみしま1号
フェリー	入港	10:09:30	10:08:35	10:07:08	10:10:20	
高速艇	入港	10:08:40	10:08:19	10:07:55	10:10:20	ふじたか
モーターボート	入港	10:09:55			10:10:20	
高速艇	入港	10:16:29	10:15:43	10:15:03	10:19:16	因島3号
漁船	出港	10:16:22	10:16:46	10:17:23	10:19:16	
フェリー	入港	10:19:29	10:18:23	10:17:14	10:21:00	第一観音
高速艇	入港	10:19:29	10:19:04	10:18:42	10:21:00	ニューホウライ
貨物船	入港	10:21:28	10:20:15	10:18:33	10:23:30	豊洋丸、船体長=フェリー
水中翼船	沖合			10:24:00		沖合通過
モーターボート	入港			10:20:58		系崎港へ入港
モーターボート	出港	10:33:06	10:33:26			系崎港へ入港
高速艇	出港	10:34:58	10:35:31	10:36:08	10:36:32	因島3号
高速艇	出港	10:35:09	10:35:48	10:36:08	10:36:32	
高速艇	出港	10:35:43	10:36:18	10:36:44	10:36:32	
フェリー	入港	10:42:31	10:41:48	10:40:50	10:44:30	
作業船	出港	10:42:51	10:43:51			
タンカー	沖合			10:40:00		沖合通過
高速艇	入港	10:49:14	10:48:48	10:48:22	10:52:18	ニューロマンⅡ
高速艇	入港	10:50:48	10:50:16	10:49:49		すずかぜ
高速艇	入港	10:51:09	10:50:41	10:49:54		因島6号
フェリー	出港	10:50:06	10:50:55	10:52:38	10:54:08	かんおん1号
高速艇	出港	10:53:56	10:54:49	10:55:55	10:56:03	西日光
高速艇	入港	10:57:36	10:57:14	10:56:43	11:00:57	おおみしま1号

point-1：航路ブイ（港内側）
point-2：ブイと浮標の中間点
point-3：航路浮標（港外側）

隻・出港 10 隻、計 18 隻、10 時台には入港 13 隻・出港 11 隻、計 24 隻が通過した。この時には 2.5 分～3 分間隔で船舶が通行していたことになる。航跡波観測時刻の水圧データと船舶航行状況の比較結果を図IV-4-5 に示す。

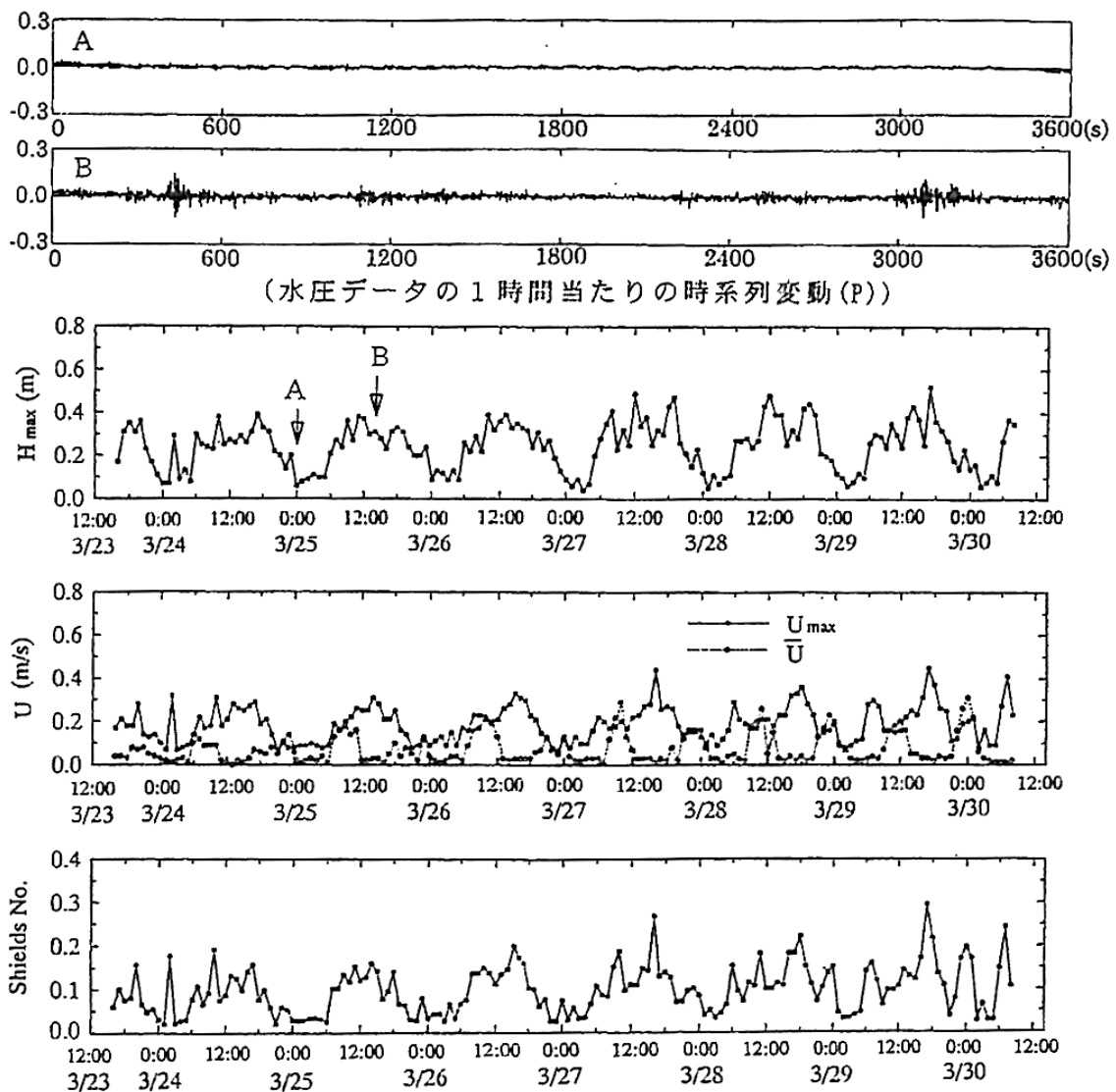


図IV-4-5 水圧測定結果と目視による船舶航行状況の比較 (1998, 3/24 9:00～10:00)

船舶通過時に水圧の変動が大きくなることが認められ、明らかに船舶通過時に測定された水圧の変動、即ち波高が大きいことが明らかである。これら変動は、航路を通過するフェリーボートや高速艇によるものと考えられた。

2. 波浪・潮流観測結果

Point-1 における波浪・潮流連続観測結果の系列変動を図IV-4-6 に示す。波群当りの波高や水圧は、深夜帯 (A: 3月25日 0:00) に小さく、船舶が繁雑に航行する昼間 (B: 3月25日 14:00) に相対的に大きい状態が観測された。また、観測日



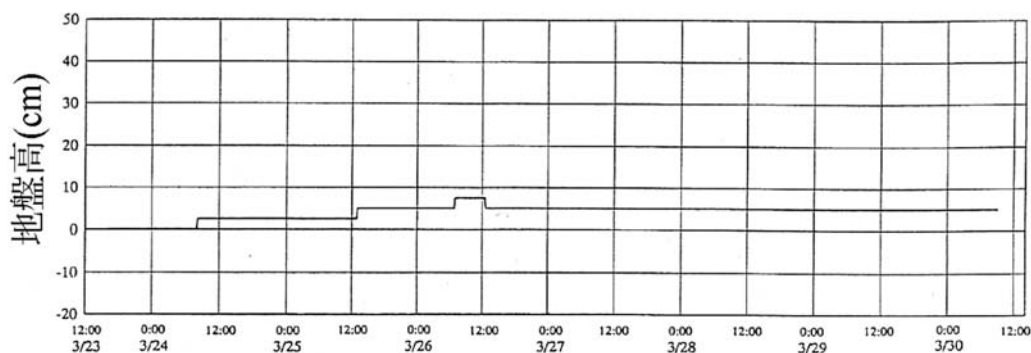
図IV-4-6 Point-1 におけるデータの時系列変動

(3月25日)の波高時系列変動においても観測期間中の最大波高は、深夜に小さく、昼間に大きい状況が認められた。

このように、観測結果は、目視観測により記録された船舶の通行状況および航跡波の来週時間と整合していた。このことから、観測された波高 0.2~0.5m 程度の波群は船舶航跡波であると判断された。また、航跡波は航路側~沖側(南側)から来襲していることが観察された。

これら航跡波による非定常流の最大流速は 0.3~0.4m/s であり、その時系列変動が最大波高に関係していたことから、ここで観測された流れも航跡波による波動流速であると判断された。この流速の大きさは、船舶が運航していない夜間帯の潮流を含む平均流速 0.1~0.3m/s よりも相対的に大きかった。

計測結果より、波・流れ共存場として算出したシールズ数の時系列変動は、最大流速(波動流速)と平均流速(潮流)の両方に関係しており、殆どの時間帯で $0 < \psi < 0.3$ であった。Point-2、Point-3 においても同様な結果が得られており、観測期間中の各観測地点における底質の移動形態は掃流移動~浮遊移動で有ることが確認された。Point-1 における地盤高の時系列変動を図 IV-4-7 に示す。観測期間中の最大地盤高は、初期値が+7.5cm であり、終了時に初期値+5.0cm であった。地盤高変動は最大 5.0cm であるが、底質移動が 0cm である期間が大部分であった。



図IV-4-7 Point-1における砂面計測定結果

3. 底質および底生生物分析結果

St. A～F および No. 1～4 で採取した底質の状況を表IV-4-3 に示す。アマモ移植地点および現在アマモが生育している場所の底質は砂あるいは砂混じりシルトであり、一方アマモ移植地点周辺と移植予定地点はシルト・粘土であった。移植試験地や移植予定地（St. A～St. D、No. 1、No. 2）の周辺の底質は、シルト以下

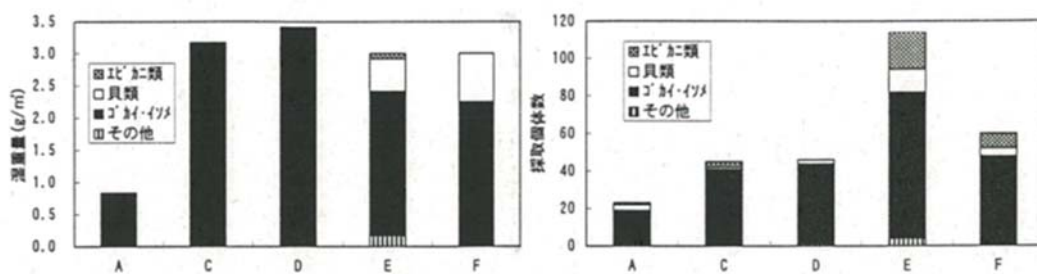
表IV-4-3 底質分析結果

地点	中央粒径 (mm)	シルト以下割合 (%)	細砂割合 (%)	外観	備考
A		89.0	10.2	硬い粘土	ふるい分け試験のため中央粒径特定出来ず
B		75.6	22.8	(欠測)	
C		97.9	1.8	粘土	
D	No.1	88.8	78.6	砂混じり粘土	
	No.2	0.37	18.4	(欠測)	
	No.3	0.08	58.1	(欠測)	60%粒径を示す
E		0.18	12.1	砂	(アマモ育成場所の底質移設)
F	No.4	0.14	25.5	砂混じり粘土	

表IV-4-4 各地点の底生生物出現状況

地点	種類数	湿重量 (g/0.12m ²)	個体数 (個体)	最多出現種	
				湿重量	個体数
A	23	0.10	23	多毛類の一種	多毛類の一種
C	16	0.38	45	ダルマガイ	エーレルシビオ
D	13	0.41 [*]	46	アシナガキボシソメ [*]	アシナガキボシソメ エーレルシビオ
E	22	0.36	114	ケンサキシビオ	スウミナナシ
F	24	0.36	60	アシナガキボシソメ	アシナガキボシソメ

*: St. Dに1個体のみ見られたカブツク(20.79g)はのぞいてある



図IV-4-8 各地点の底生生物出現傾向

の割合が75%以上、中央粒径が0.425~0.075mmの細かい砂が多かった。アマモの分布場所(St. F、No. 3、No. 4)とアマモ分布場所の底質が移設された試験移植地内(St. E)は、 $d_{50}=0.1\sim0.2\text{mm}$ 程度、シルト以下割合が40%以下であった。

移植試験地や移植予定地周辺の底生生物は、表IV-4-4および図IV-4-8に示すように出現個体数および湿重量の大部分を多毛類が占めた。一方、アマモの自然分布場所(St. F)およびここから底質とアマモを移植した場所(St. E)では、多毛類の他に甲殻類や貝類が出現した。

IV-4-5 航跡波を用いたシールズ数の算出

観測地点の底質安定性だけで面的に分布するアマモ場の外力を評価することは不十分であり、アマモ場を含む広領域の外力の把握を行う必要がある。そこで、アマモが現在分布している場所および移植試験地、移植予定地の外力分布を数値計算により求め、現状でのアマモ分布と比較した。

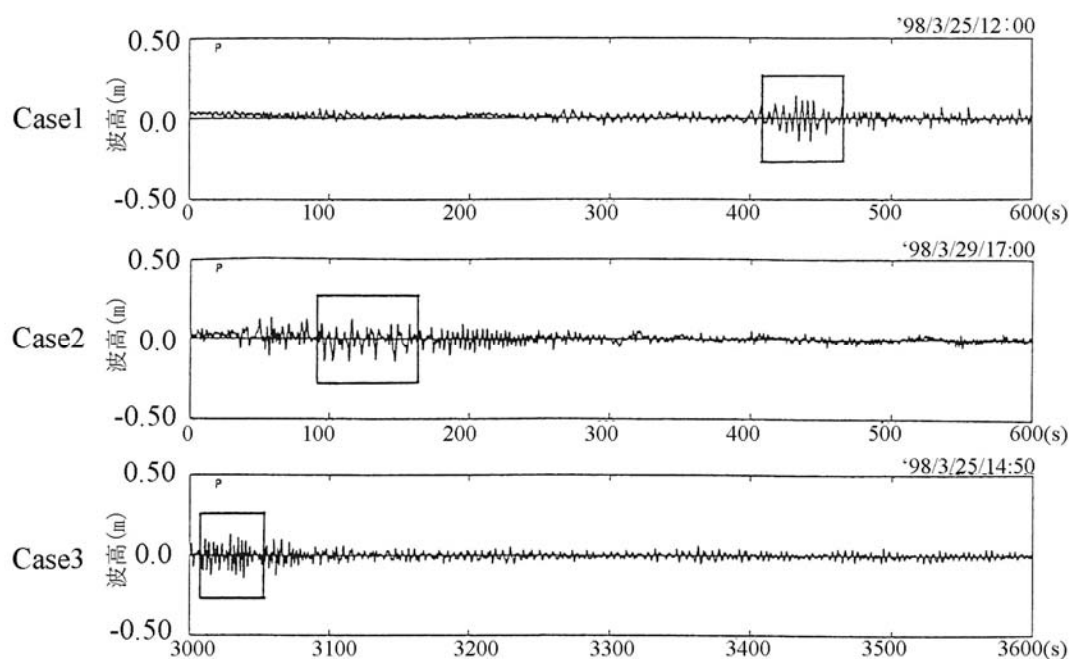
底質の調査結果で明らかになったように、この事例では、アマモ移植予定場所が殆どシルト・粘土よりなるアマモ分布に適さないとされる底質条件であった。このため、アマモは、移植元の底質とともに移植することになっている。そこで、底質安定性を評価する上では、仮想的に移植先の底質も移植元の底質と同じであると仮定した。また、底質は層厚30cmで移植するため、前述のとおり数値計算を行う上で移植先の地盤高は底質配置を考慮した。

1. エネルギー平衡方程式の評価

エネルギー平衡方程式により算出した波浪場によるシールズ数と観測された流速データにより算出したシールズ数とを比較し、エネルギー平衡方程式を用いて航跡波やシールズ数を評価することの妥当性を検討した。航跡波の観測データ解析による観測地点Point-1における波浪・潮流の諸元を表IV-4-5に示す。

表IV-4-5 航跡波、潮位、潮流、底質の各諸元

項目		Case1	Case2	Case3
潮位	W.L.(m)	+1.8	+0.1	+1.0
波浪	波高 H_0' (m)	0.37	0.35	0.31
	周期 T(s)	4.5	4.5	4.5
	波向き θ (°)	-61	-35	-93
潮流	潮流流速 U(m/s)	0.02	0.07	0.06
	潮流方向 ϕ (°)	16	-121	-116
底質	底質比重 ρ_s	2.499		
	中央粒径 d_{50} (mm)	0.18		
発生日時		2021/3/25 12:00	2021/3/29 17:00	2021/3/25 14:50



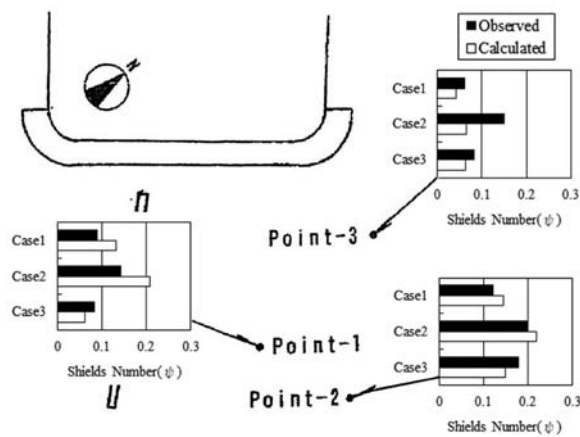
図IV-4-9 計算に用いた航跡波群の波形

Case 1～Case 3 の計算条件としては図IV-4-9 に示す航跡波波群を用いた。これらは、波高が比較的高く、周期・波向が平均的と考えられる条件である。このうち、Case 2 は大潮干潮時に相当している。

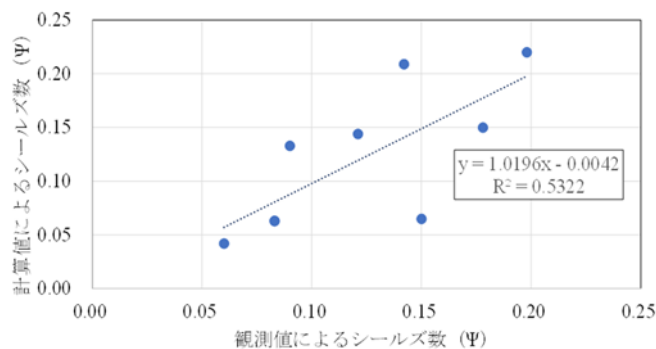
水圧および流向流計で計測を行った Point-1～Point-3 の地点について、各地点に表IV-4-5 に示した条件でエネルギー平衡方程式を用いて再現計算した波高・流

速を用いてシールドズ数を計算した。また、Point-1～Point-3の地点において Case 1～Case 3 と同一時刻の実測値よりシールドズ数を計算した。

これらの地点別のエネルギー平衡方程式を用いて計算したシールドズ数および観測データにより計算したシールドズ数を図IV-4-10に示す。航路に最も近い Point-3 では、計測値によるシールドズ数が常に計算値より大きな傾向が認められた。各ケースとも数値・傾向に大きな差は認められなかった。両者の関係は、図IV-4-11に示すように相関が高いという状態でないものの、多少の誤差を許容すればエネルギー方程式を用いた航跡波分布によるシールドズ数の計算が可能である。



図IV-4-10 シールドズ数の比較（観測値と数値計算結果）



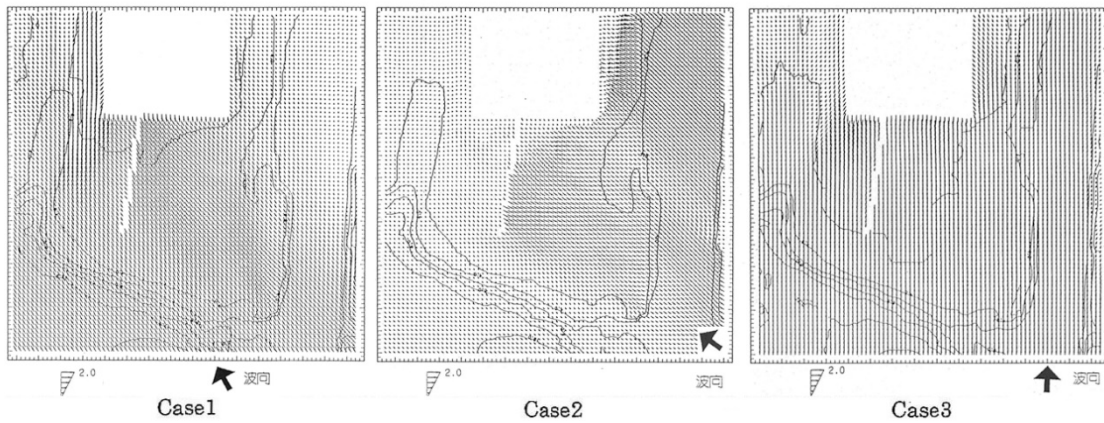
図IV-4-11 観測値と数値計算結果によるシールドズ数の関係

2. シールズ数分布の現況再現

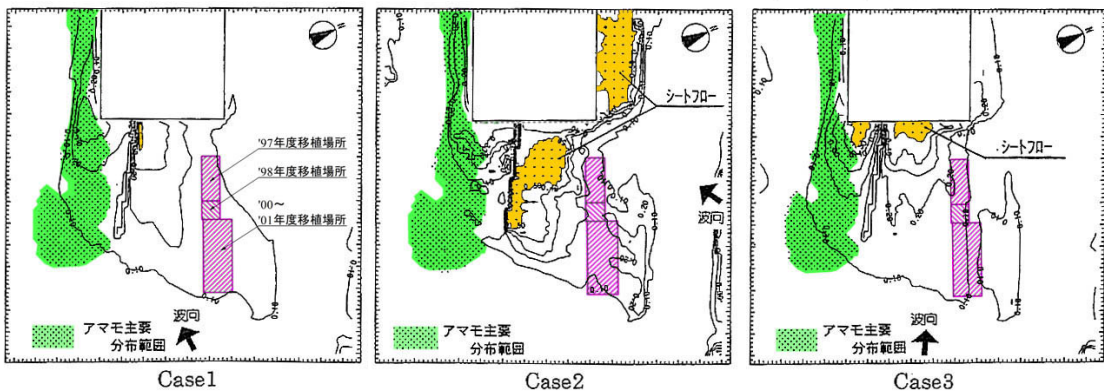
現地で計測された航跡波と数値計算で得られた航跡波高によるシールズ数との整合が Point-1～Point-3 で確認できたので、アマモ群落分布と比較するために Case 1～Case 3 の条件における波浪状況およびシールズ数の平面分布を計算した。

航跡波による波向き分布再現計算結果を図IV-4-12、シールズ数分布の現況再現結果を図IV-4-13に示す。航跡波が沖側から入射する Case 1 および Case 3 では、埋立地護岸前面の極浅い部分を除いて、シールズ数が $0.10 < \phi < 0.40$ であり、移植予定地周辺が底質の安定性から見たアマモ分布可能範囲内であった。

一方、航跡波が航路側より入射する Case 2 では、導流堤の航路側前面に $\phi > 0.5$



図IV-4-12 航跡波による波向き分布再現計算結果



図IV-4-13 航跡波によるシールズ数分布計算結果

で底質移動がシートフローとなる「アマモ分布に適さない範囲」が認められた。

この範囲には、アマモの分布が認められなかった。

なお、導流堤は航路側から来る波を低減させるため、沼田側河口側でシールズ数が $0.10 < \phi < 0.30$ 程度まで低減されている。また、この範囲には、濃生～疎生のアマモ群落がまとまった面積で分布している。

航跡波が航路側から来襲した場合、導流堤は航路側から来る波を低減させ、これにより導流堤河口側のシールズ数が低減するこの存在が現地の波高とシールズ数の分布およびアマモ場分布に影響を与えていることが明らかになった。

現地におけるシールズ数の大小は、非定常流（波動による流れ）と定常流（潮流）の影響を受けている。入射波の諸元が等しい場合に波動による流れで決定されるシールズ数は、水深が浅くなるほど底面波動流速が大きくなるため、潮位（水深）に大きく支配される。一方、潮流によるシールズ数は、一般的に大潮の引き潮、上げ潮時に大きな値を示す。そこで、観測期間中最も潮位が下がった時の潮位が支配的なケース（Case A）、および観測期間中最も潮流流速が大きかった時の潮流が支配的なケース（Case B）の波・流れを入力条件としてエネルギー平衡方程式により波・流を計算し、シールズ数の平面分布を求めた。

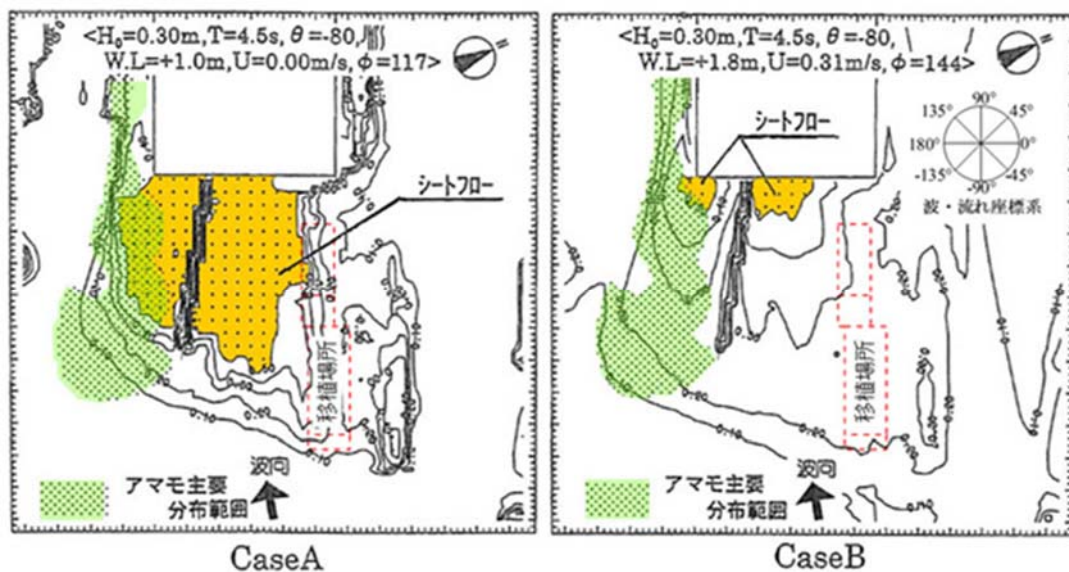
表IV-4-6 潮位および潮流が支配的なケースの各諸元

Case		CaseA	CaseB
状況		潮位が支配的 観測期間中の最低 潮位時の状況	潮流が支配的 観測期間中の最大 流速時の状況
潮位	W.L.(m)	+0.1	+1.8
波浪	波高	0.3	
	周期	4.5	
	波向き	-80	
潮流	潮流流速	0.00	0.31
	潮流方向	117	144
底質	底質比重	2.499	
	中央粒径	0.12	

Case A、Case B の諸元を表IV-4-6 に示す。諸元を決定する上での共通の条件として、波高は $H=0.20\text{m}$ 以上の平均的な状況、周期と波向は検討期間中の平均値とした。この条件によるシールズ数分布状況を図IV-4-14 に示す。図中にはアマモ分布範囲と移植場所も示した。

潮位が低く波浪の影響を大きく受ける Case A では、アマモ現存区域のシールズ数が $0.10 < \phi < 0.50$ 、移植実験地および移植予定地のシールズ数が $0.10 < \phi < 0.40$ の範囲であった。

通常、シールズ数 $\phi > 0.5$ を越え、シートフロー状態の激しい砂移動が生じる場所にはアマモが定着しないとされている。このケースで広い範囲が $\phi > 0.5$ となるのは、潮位が $+0.1\text{m}$ と非常に低い春期の大潮干潮時の約 4 時間程度という一時的なものである。また、航跡波は持続的に作用するものではなく、幾つかの波群が間隔を置いて作用するので、この程度の時間に底質を大幅に攪乱するには至らないと考えられる。このため、 $\phi > 0.5$ の範囲でもこれが短時間ならばアマモが分布



図IV-4-14 潮位・潮汐が支配的ケースのシールズ数分布

可能であろうと推察される。

一方、潮位が大きく潮流の影響が大きいと考えられた Case B では、アマモ現存場所のシールズ数が $0.10 < \phi < 0.40$ 、アマモ移植場所のシールズ数が $0.20 < \phi < 0.30$ であり、移植実験地、移植予定地ともアマモ分布が可能な状態であった。このため、ここでは、潮流が底質移動を引き起こし、アマモ分布に影響する可能性が低いものと考えられる。

しかしながら、現状において導流堤両側に付け根の部分にシールズ数分布よりアマモ分布可能と考えられる範囲でもアマモが分布していない、あるいは群落点存在する範囲が広がっている。この要因の一つとして、前述のように導流堤前面の底質は、含水率が低い硬い粘土であるため、アマモの生育に適していないことが考えられる。この部分は、潮位が支配的な場合でも底質安定性が確保されているので、ここにアマモ生育に適した底質を配置すればアマモの分布が可能となるものと考えられる。

IV-4-6 結果の評価

船舶航跡波の影響する場において、エネルギー平衡方程式を用いて波の場およびシールズ数の平面分布を求め、アマモ分布と比較することにより以下のことが明らかになった。

- ① 多少の誤差を許容すれば、エネルギー平衡方程式を用いて航跡波を対象としたシールズ数の計算を行うことが可能である。
- ② シールズ数分布の現況再現結果ではアマモ移植地周辺は底質移動から見たアマモ分布可能範囲内であった。
- ③ 潮位または潮流が支配的なケースにおいてシールズ数分布を算出した結果、潮流が支配的なケースでは、アマモ移植場所の外的条件は問題なかったが、潮位

が支配的なケース（潮位が低く底質が波浪の影響を大きく受ける場合）では、アマモ現存区域においてシールズ数が $\phi > 0.50$ となる場所が一部認められた。

しかし、春季の大潮干潮時のような短期間であれば、底質の移動状況がシートフロー状態となる場合でもアマモは分布できるものと推定された。

アマモ移植場所は、移植した底質が大潮干潮時でもシートフロー状態にならない水深で底質の安定性からアマモ分布可能範囲内であることが確認された。

④外的条件がアマモの定着、生育に適しているにも関わらず、アマモが見られない範囲は、底質が硬い粘土であり、底質に問題があると推定された。このため、底質を改善することによりアマモの分布が期待された。

⑤底質および底生生物分析結果

移植試験地や移植予定地の周辺の底質は、殆どがシルトと粘土であり、表面より 3～5cm 以深がかなり硬いことが採集時に確認された。また、アマモ分布場所と試験移植地内は、 $d_{50} = 0.1 \sim 0.2 \text{mm}$ 程度のシルト混じり細砂であった。事前調査でもアマモ分布範囲の底質は $d_{50} = 0.1 \sim 0.2 \text{mm}$ 、含水率が 30～40%、かつシルト以下割合が 40%以下の細砂とシルトであるが、移植予定地周辺では含水率が 30～40%の硬いシルトと粘土が分布していることが観察されている。

なお、海底表面に圧密を受けて固化した粘土が露出することは希なことであり、これは何らかの原因により表面を覆っていた土砂などの底質が流失したものと推察される。即ち、現在の粘土層は、かつて砂によって被覆され圧密していた。しかし、1927年の導流堤建設以来、河川からの砂の供給がなくなり、70年以上経過する間に表面の砂が流出して形成されたものと推定された。

移植試験地や移植予定地周辺の底生生物は多毛類が殆どであったが、アマモの自然分布場所（St. F）およびこれを移植した場所（St. E）では、多毛類の他に甲殻類や貝類が出現していた。これらのことから、今回採用したアマモを底質ごと

移植する工法では、アマモ分布場所の底生生物相も移植されていることが確認できた。

IV-5 移植後モニタリング

IV-5-1 はじめに

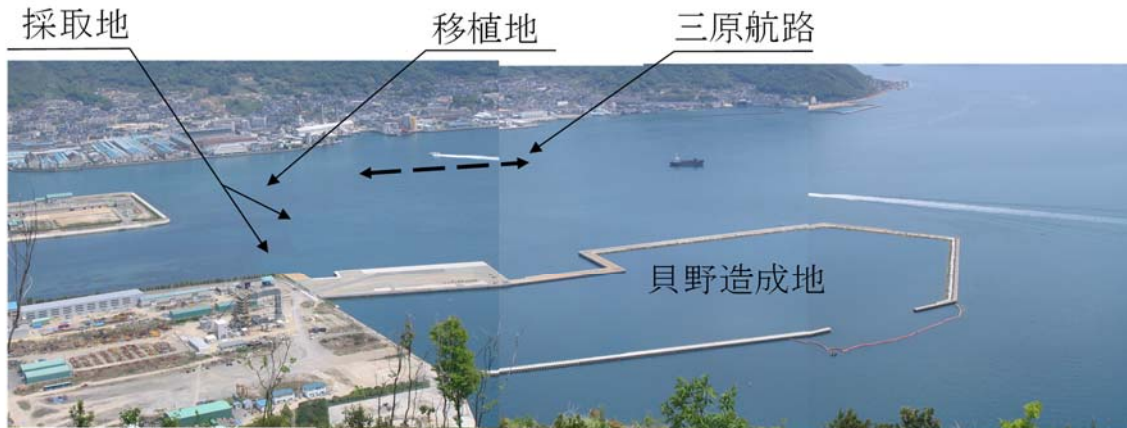
広島県三原港地区における 1997 年～2001 年度のアマモ移植では、1997 年度の試験移植段階で物理環境調査と潮流シミュレーションを実施し、移植場所がアマモ生育適地であることの確認を行った上で、表IV-5-1 に示すように、以後の移植工を実施した。

移植後も継続してモニタリングが行われており、移植したアマモの生残、および実生株による群落更新が確認されている。さらに、移植アマモ群落を含む天然アマモ群落の面積は当初よりも拡大している（山本ら 2004）。

移植後の周辺環境にも変化が認められた。1999 年 5 月には西瀬戸自動車道路「しまなみ海道」が開通し、これによって移植場所から 200m 離れた三原航路を通過する定期船数がフェリー 40%、高速船 69%、全体で 56%に減便となり航走波の環境が変化した（山本ら 2004）。さらに、2001 年 9 月には、移植場所の西側である貝野地区で図IV-5-1 に示すように埋立外周護岸が沖側に延伸した。これにより、アマモ群落付近へ作用する波や流れなどの外力的変化が考えられた。

表IV-5-1 アマモ移植工程（中瀬・百瀬 2002）

工期	移植面積 (m ²)	備考
1997年11月～1998年3月	3,000	試験移植
1999年10月～1999年1月	1,300	
2000年11月～2001年4月	6,768	
2001年12月～2002年3月	1,008	
合計	12,076	



図IV-5-1 移植地西側の地形変化（2004.4.26撮影）〔山本ら(2004)発表スライドより〕

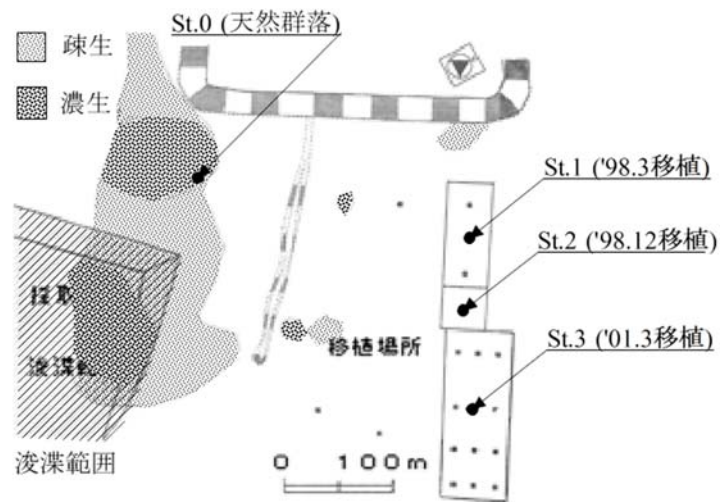
IV-5-2 モニタリング方法

1. アマモのモニタリング調査

アマモの移植は1997年度～2001年度の11月～3月に行われたが、アマモ群落の調査は1994年6月から断続的に行われていた。1997年および2003年には、平面的なアマモ群落の分布状況が調べられている。1998年以降、図IV-5-2に示す各年度の移植場所中央部分（St. 1～St. 3）、および周辺海域（St. 0）に観測点を設定し、これらの点に2m×2mのコドラートを配置して4m²当りのアマモ株数と被度および標準草丈を潜水観察により計測した。なお、12月～3月までは実生個体を識別して記録した（山本ら2004）。

2. 光環境.

当該海域のアマモ移植は、D.L.-0.5～-1.5mに分布するアマモ群落のうち約1.1haを水深D.L.-1.5mに移植したものである。M.W.L.時の水深（D.L.+2.0m）では、アマモ移植元D.L.-0.5mが水深2.5m、移植先D.L.-1.5mが水深3.5mであった。沿岸部において水深が1m大きく（深く）になると、海底部分に到達する光量が減衰し、これによりアマモの生育状況に影響することが考えられる。そこで、山本ら(2004)は、アマモ分布水深付近の月別光量を算出して、アマモの生



図IV-5-2 移植アマモモニタリング地点

育状況と比較した。算出の手順を以下に示す（山本ら 2004）。

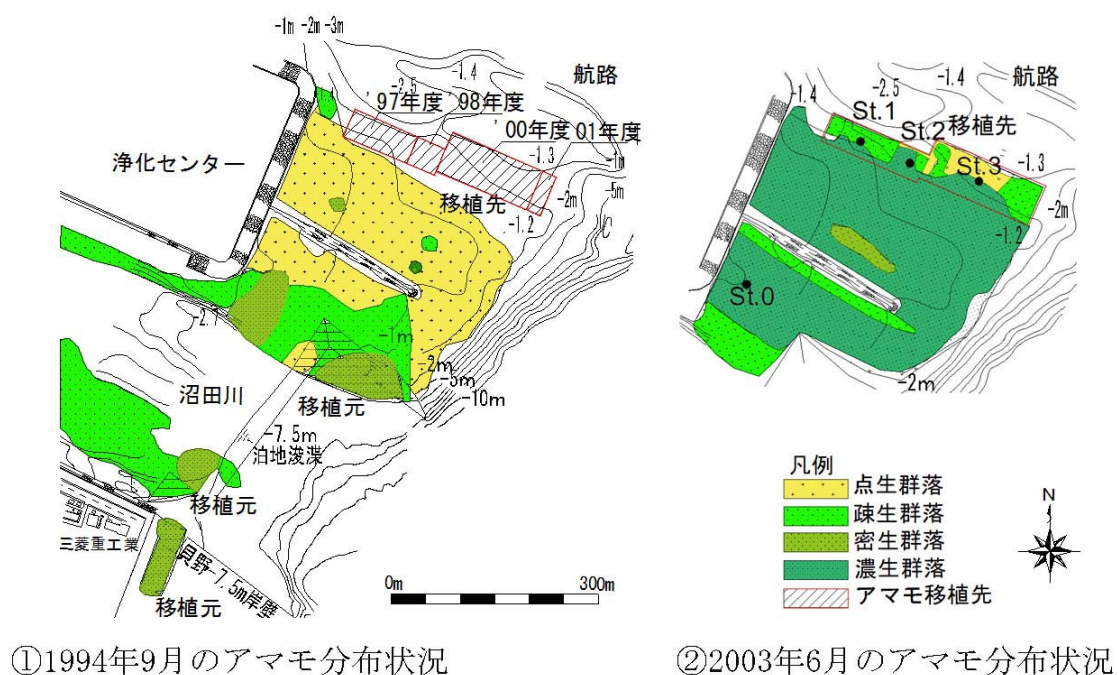
- ① 理科年表（1997年版）に掲載された最寄り気象台である広島市の計測結果による全天日射量を光量に換算した（ $1\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{日} = 4.67\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ ）。
- ② 石川ら(1988)の方法と同様に全天日射量の42%が光合成有効波長であり、空中から水面直下には空中の79%の光エネルギーが透過すると仮定した。
- ③ 光の減衰率は、水中の光量が広島県による1998・1999年度の尾道糸崎港貝野地区藻場移植追跡調査業務で測定された水中照度の鉛直分布調査結果より算出し、光量の減衰率は調査期間中の各水深別最大減衰率を採用した。

IV-5-3 モニタリング結果

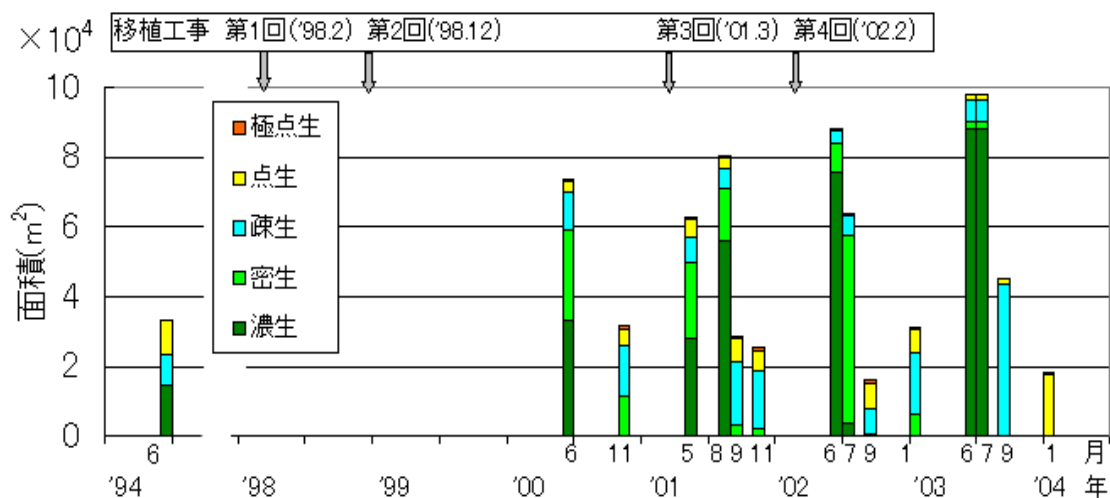
1. アマモ群落の経時変化

施工前（1994年）と竣工後（2003年）のアマモ分布状況の比較を図IV-5-3に示す。両年度で調査季節は異なるが、2003年6月の繁茂期には移植先内で点生～濃生のアマモ分布が確認された（山本ら2004）。

浄化センター地先の天然および移植アマモ生育面積について、被度を考慮してアマモ分布面積に被度別の係数（濃生 0.875、密生 0.625、疎生 0.375、点生 0.115、極点生 0.025）を掛けて面積に換算したものを図IV-5-4に示す（山本ら2004）。移植先を含む天然アマモ群落は、6月頃を最盛とする年変動を示しながら生育面積を増大させていた。



図IV-5-3 1994年と2003年のアマモ分布状況の比較（山本ら2004）



図IV-5-4 被度を考慮したアマモ群落面積の経年変化（山本ら 2004）

2. 移植アマモの生育状況

当該海域では、図IV-5-5に示すように移植した St.1～St. 3 で移植直後にアマモの株数が移植当初の 10～20%程度に低下した。その後、株数と生育密度が減少したままの状態推移していることが確認された。なお、密度低下後の残存株の中には実生株も確認された。

最初に移植した St.1 では、移植後 6 年を経過した後もアマモが生育していることが確認されている。St.1 では、移植当初 30～40 株/m²であったものが、翌年に 3～5 株/m²まで減少したが、冬季にその 30～100%が実生株となっていた。なお、天然群落の実生株の割合は 5～15 株/m²程度であった。

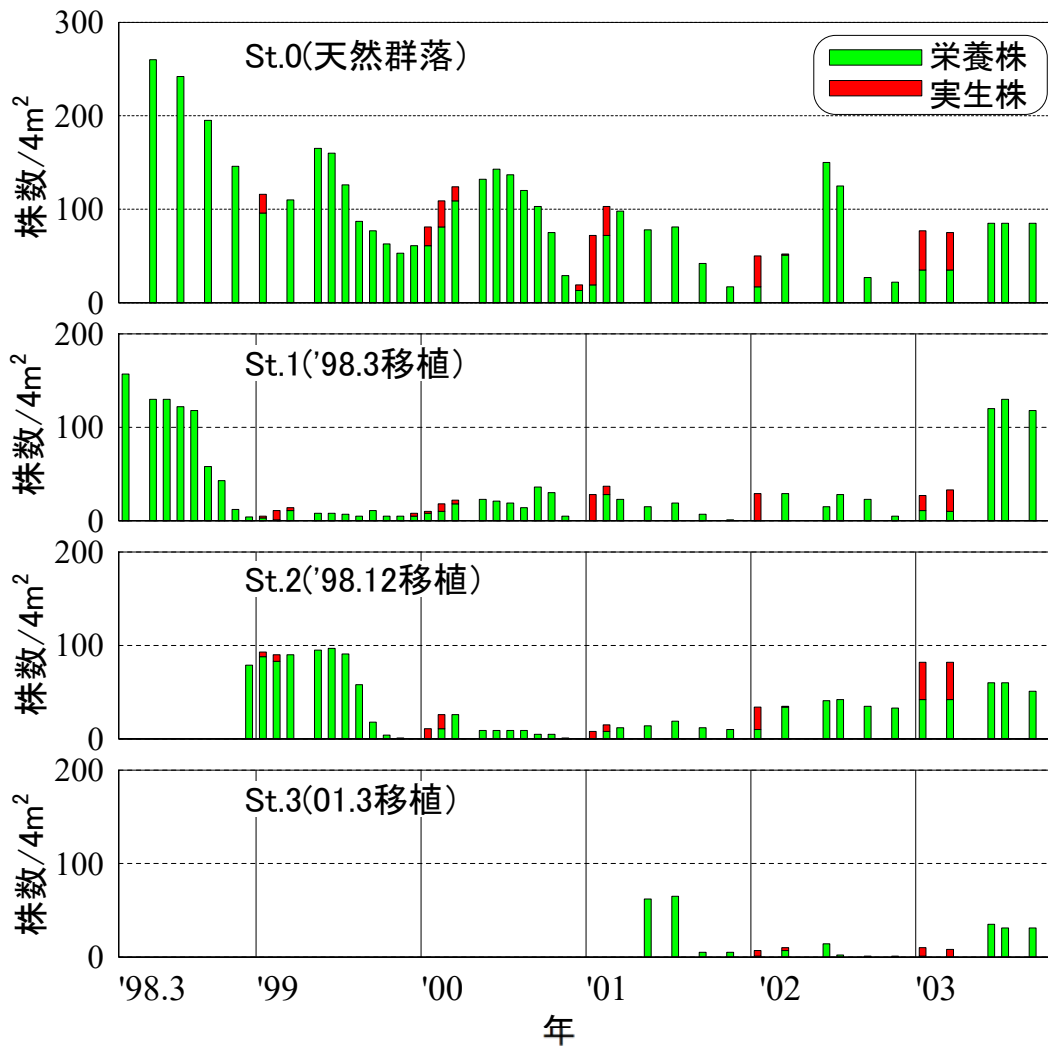
3. 光環境

各月の水深別日平均光量算定結果より、これらの年平均値を表IV-5-2に示す。地盤高は、アマモ移植元が D.L.-0.5m、移植先が D.L.-1.5m であり、M.W.L.時の水深（D.L.+2.0m）を考慮すると、それぞれ水深 2.5m、3.5m に相当した。

各水深の光量は、以下の方法によって算出した。全天日射量 1MJ/m²・日=光量 4.67E/m²・日、全天日射量の 42%が光合成有効波長、79%の光量が空中から水面

直下に透過すると仮定している（山本ら 2004）。

移植元（水深 2.5m）には濃密なアマモ群落が発達し、年平均光量 6.3



図IV-5-5 天然群落とアマモ移植先の株数の経年変化（山本ら 2004）

表IV-5-2 各月および年間平均の水深別日平均光量算定結果（山本ら 2004）

水深(m)	水深CDL基準(m)	光量減衰率(%)	日平均光量月間平均値 (E/m²日)												年間平均値
			4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
海面直下	2.0	100.0	25.1	28.2	25.7	26.5	27.6	21.6	18.6	13.8	11.9	13.2	16.0	20.2	20.7
0.5	1.5	74.3	18.7	21.0	19.1	19.7	20.5	16.0	13.8	10.3	8.9	9.8	11.9	15.0	15.4
1.0	1.0	65.1	16.4	18.4	16.8	17.3	18.0	14.0	12.1	9.0	7.8	8.6	10.4	13.1	13.5
1.5	0.5	56.1	14.1	15.8	14.4	14.9	15.5	12.1	10.6	7.9	6.8	7.5	9.1	11.5	11.8
2.0	0.0	42.7	10.7	12.0	11.0	11.3	11.8	9.2	7.9	5.9	5.1	5.6	6.8	8.6	8.8
2.5	-0.5	30.3	7.6	8.6	7.8	8.0	8.4	6.5	5.6	4.2	3.6	4.0	4.8	6.1	6.3
3.0	-1.0	21.0	5.3	5.9	5.4	5.6	5.8	4.5	3.9	2.9	2.5	2.8	3.4	4.2	4.4
3.5	-1.5	20.1	5.0	5.7	5.2	5.3	5.5	4.3	3.7	2.8	2.4	2.6	3.2	4.0	4.2
4.0	-2.0	13.9	3.5	3.9	3.6	3.7	3.8	3.0	2.6	1.9	1.7	1.8	2.2	2.8	2.9
4.5	-2.5	9.7	2.4	2.7	2.5	2.6	2.7	2.1	1.8	1.3	1.2	1.3	1.6	2.0	2.0

E/m²・日、最大光量月（5月）に平均光量が 8.6E/m²・日、最小光量月（12月）に平均光量が 3.6E/m²・日であった。一方、移植先（水深 D.L.-3.5m）では、年平均光量が 4.2E/m²・日であり、最大光量月の平均光量が 5.7E/m²・日、最小光量月の平均光量が 2.4E/m²・日となり、移植元よりいずれの光量も約 35%低かった（山本ら 2004）。

IV-5-4 移植結果の考察

1. アマモ群落移植結果

この事業では、物理的条件が適正と考えられた場所にアマモ群落を底質ごと移植した。この物理的条件に影響するのは、三原港に入出港する船舶による航跡波であった。この航跡波を入力条件として、エネルギー平衡方程式を用いて波高分布を再現して計算したシールズ数を評価した。その結果、移植場所は、航跡波による底質移動がシールズ数 $\psi < 0.5$ のシートフロー状態にならない場所であることが確認された。ここに移植した株は、移植直後急速に株密度が減少したが、その後も生育が確認され、移植 1 年後の 1~3 月に実生株が確認された。

寺脇ら(2009)は、水槽内に播種したアマモの観察により、播種後 2 年目から花枝化する株を確認した。株密度は、季節的な増減を繰り返し、播種後 5 年目に最大密度に達し、その後 5 年間ピーク時以下の生育密度が確認された。

三原港地区での最初の移植は 1998 年 3 月であり、5 年間のモニタリング期間中、実生株が毎年確認されている。移植元におけるアマモ群落の年級構成に関する情報は得られていないが、寺脇ら(2009)の結果より判断すると移植したアマモは少なくとも発芽後 2 年以上経過した株を含む群落であったことになる。

ここで確認された実生株は、移植した群落内の花枝より供給された種子によるものか、あるいは周囲のアマモ場から供給された種子によるものかの判断はでき

ない。しかし、アマモが分布可能な物理的条件を満たした場所において、毎年コンスタントに実生株発生が確認されたことは、移植場所が持続的なアマモ群落成立条件を満たしていたことを示しており、実際に群落も継続的に維持されていた。

2. 移植後アマモ株密度減少要因

移植直後約 30 株/m²であったアマモ株密度は、1 年後に 1~5 株/m²に減少し、その状態で推移した。アマモを移植した場所は、波浪・潮流による底質安定性で移植元の天然群落と同様である。また、移植にはアマモ群落の底質をそのまま層厚 30cm で移設している。移植元と移植先で異なる条件は水深である。水深は、アマモ移植元 D.L.-0.5m が 2.5m、移植先 D.L.-1.5m が 3.5m である。沿岸海域において水深が 1m 増大すると、海底付近に到達する光量が低減することが考えられ、実際に表IV-5-2 に示したように平均潮位時水深 2.5m で濃密なアマモ群落が周年分布する移植元での年平均光量が 6.3E/m²・日、最大光量月（5 月）の平均光量が 8.6E/m²・日、最小光量月（12 月）に平均光量が 3.6E/m²・日であるのに対して、平均潮位時水深 3.5m の移植先では、年平均光量が 4.2E/m²・日、最大光量月（5 月）に平均光量が 5.7E/m²・日、最小光量月（12 月）に平均光量が 2.4E/m²・日と移植元よりも低かった。

アマモの分布に係わる光量条件について表IV-5-3 に示すように川端(1996)は、山口県柳井湾でのアマモ場の調査より、アマモ場造成の光環境として年平均底層

表IV-5-3 三原港地区アマモ移植地点の光量と既存分布条件の比較

単位	地盤高 D.L.=0m m	平均 潮位時 水深 m	光量 減衰率 %	日平均光量月間平均値		年間 平均値	出典
				最大光量月 (5月) E/m ² ・日	最小光量月 (12月) E/m ² ・日		
採取地点	-0.5	2.5	30.3	8.6	3.6	6.3	山本ら(2004)
移植地点	-1.5	3.5	20.1	5.7	2.4	4.2	
周年密生分布				6.0	1.6	4.4	川端(1996)
望ましい光条件				繁茂期平均 (春~夏) 3.0	衰退期平均 (秋~冬) 1.5	年間平均 2.5	

光量が $2.5 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ 以上、かつ繁茂期である春～夏季に $3.0 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ 以上、衰退期である秋～冬期でも $1.5 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ 以上であることが望ましいとした。

以上の光条件を表IV-5-2 に示した三原港の海中光量測定結果および移植元と移植先の水深に当てはめて、移植地のアマモ生育状況を評価した。

移植元の D.L.=-0.5m 地点での光量は、年平均 $6.3 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ であり、最大 $8.6 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ 、最小 $3.6 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ であった。最大光量月（5月）の月平均光量が $8.6 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ であり、周年にわたる密生群落形成が可能な光量範囲内であった。実際ここでアマモは周年分布していた。

移植先の D.L.-1.5m は、最小光量月である12月の日平均光量月間平均値が $2.4 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ であった。これは、川端(1996)の「望ましい光条件」の衰退期平均光量である $1.5 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ 以上であり、衰退期でも生育が可能と判断された。

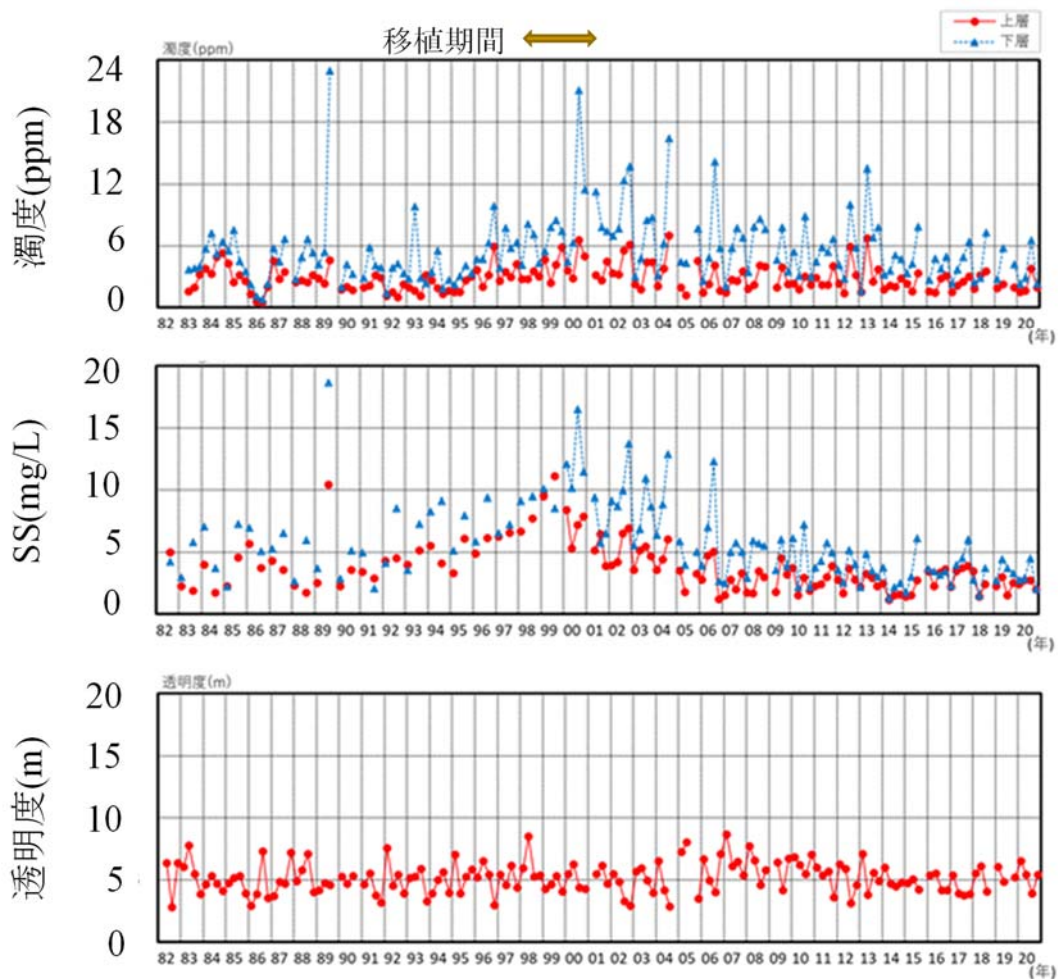
最大光量月である5月の日平均光量の月間平均値 $5.7 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ は、川端(1996)の「望ましい光条件」を満たし、アマモの周年密生分布条件の $6.0 \text{ E/m}^2 \cdot \text{日}$ に相当した。このことから、アマモは、光量的に周年分布が可能であるものの、密生群落形成の限界付近にあると判断された。

3. 群落拡大の原因

図IV-5-3 および図IV-5-4 に示したように2003年以降、この海域全体の繁茂期におけるアマモ群落面積は増大している。アマモの移植は、既存のアマモ群落の場所を移動しただけなので、アマモ群落面積の増大に寄与していない。このアマモ場の増加には、瀬戸内海の水質改善、船舶航行量の減少による航跡波影響の減少、図IV-5-1 に示した埋立外周護岸の完成による流況変化が考えられる。

水質改善については、透過光量に関わる濁度、SS、透明度の経時的変化状況を確認した。三原港が位置する備讃瀬戸海域の濁度・SS・透明度の変化を瀬戸内海総合水質調査ホームページ(2021)から抽出したものを図IV-5-6 に示す。備讃

瀬戸海域では、2001年の移植時と比較して濁度や透明度に顕著な変化が認められていないものの、SSの減少傾向が認められた。SSは、アマモ葉上に堆積すると、アマモの光合成が阻害・抑制されると考えられる。SSの低減は、この原因を緩和していた可能性がある。また、SSが低減すれば、海中に到達可能な光エネルギー量の減衰も小さくなったと考えられる。これに伴い、透明度は2003～2007年に若干増大しており、僅かながらアマモに到達する光条件が改善されたものと考えられる。



図IV-5-6 備讃瀬戸海域の濁度・SS・透明度の変化
 (国土交通省中国地方整備局港湾空港部：瀬戸内海総合水質調査ホームページ
<https://www.pa.cgr.mlit.go.jp/chiki/suishitu/index.html>より)

海上船舶交通の変化については、1999年5月の「しまなみ海道」開通により移植場所の東側約200mにある三原航路を通過する定期船数のうち、フェリーが40%、高速船が69%の減便となり、全体の通過船数で56%に減便となった（山本ら2004）。移植場所は、当初より航跡波の影響により底質移動がシートフロー状態にならない場所と判断された場所であったので、アマモの増減に船舶交通量減少、即ちシートフロー状態になる機会の低下が影響しないと考えられる。しかし、当初のアマモ移植元の採取場である埋立地前面の水深が小さい（浅い）場所では、潮位が低い時に一時的に船舶航跡波により底質移動がシートフロー状態になっていた。ここで、船舶交通量が減少したことは、シートフロー状態になる機会が低下したことになる。山本ら(2004)によれば、アマモ群落外縁のシールズ数は、1994年より2003年の方が小さくなっていたと報告されている。このことは、アマモが底質の移動により流失する危険性が軽減されたことを示している。

潮流面では、2001年9月にアマモ移植場所南側の沼田川河口部で図IV-5-1に示した埋立地の護岸岸締切工事が始まり、上げ潮時、下げ潮時の最大流速分布に変化が生じていると考えられたが、移植場所付近で大きな変化は認められなかったと報告されている（山本ら2004）。

第V章 他種の花草への適用

V-1 はじめに

我が国沿岸にはアマモ以外にも砂泥や礫の海底に分布する多くの種の花草があり、これらも外力が分布を決定すると考えた。そこで、群落造成や保全対象の花草について、数値計算による波や流れの分布と群落の存在とを比較した。この結果を用いて、海草群落分布可能範囲を波や流れによるパラメータより特定できることを明らかにした。

海草群落が波・流れおよび底質安定性にシールズ数をパラメータとしてその群落分布が決定されることは、丸山ら(1987)をはじめとして中瀬ら(1992)、島谷ら(2002)、金澤・森(2003)、森田・竹下(2003)などの研究により一般化されており、海草群落造成のマニュアルにも適用されるようになっている。

アマモ同様に沿岸の砂泥海底などに生育する他種の花草類も波浪の作用する場所に分布しているので、波浪や底質安定性がその分布可否に大きく影響すると考えられる。今までアマモ以外にこの考え方を適用して、その分布範囲の条件を抽出した事例や群落再生の計画を行った事例は少ない。

そこで、本研究では沿岸の花草類の中でアマモとほぼ同様の場所に分布するコアマモおよび南西諸島に分布する絶滅危惧種ウミショウブについて、その分布場所の条件を波浪などの物理的外力の平面分布計算を用いて明らかにした。

V-2 コアマモへの適用

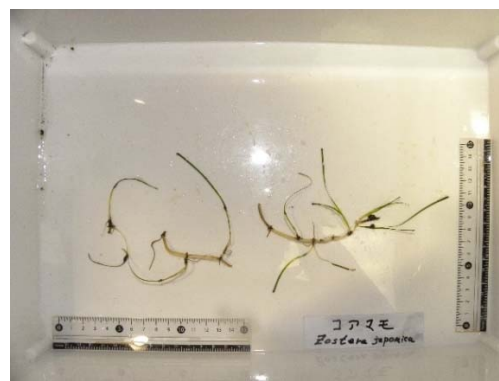
V-2-1 コアマモの生育条件および移植実績

アマモは平均干潮面（L.W.L.）以深に分布し、その分布限界水深は丸山ら（1987）の調査で年間平均光量 $3E/m^2 \cdot 日$ 以上、また森田（1989）によれば簡易的には年間平均透明度に相当する水深が分布下限とされる。これに対してアマモの近縁種で潮間帯でも生育可能なコアマモ（*Zostera japonica*）について越川ら（2007）は、底質条件の適用範囲も広く、濁りにより透明度の低い大都市沿岸の人工干潟上でも群落造成の可能性があるとしている。

図V-2-1 に示すようにコアマモはアマモより小型である。新崎（1950-1）によれば、アマモは葉幅が7~12mm、葉長が30~140cm に対し、コアマモは葉幅が2~3mm、葉長が15~30cm である。コアマモは、潮間帯の干出する場所にも分布し、越川ら（2007）によればアマモよりも高温耐性が大きい。実際に、島谷（2007）によれば、千葉県富津干潟においてコアマモは、潮間帯の T.P.-0.5~-1.0m の狭い範囲に分布していた。また、国分ら（2010）は、水槽内の実験でコアマモの分布が干出時間 2 時間以内で地温 29℃以上にならない場所としている。また、コアマモ群落は、地上部の季節変動が大きいものの、地下茎のバイオマス



①アマモ



②コアマモ

図V-2-1 アマモとコアマモ（横須賀市海域で2020年に採取）

が安定してるとした。コアマモは、地下茎が発達し、特に冬季の衰退期に地上部分の1~1.4倍の重量を持ち、地下茎による生長も早く、1年目に0.09m²であったものが2年目に1m²、3年目に4m²に拡大したとの新崎(1950-2)による観察事例もある。湯浅ら(2006)による水槽内水理実験では、コアマモ群落の発達した地下茎が海底への作用流速を約1/3に低減し、干潟の地形形状と底質粒度を安定させる効果を持つことが示され、海浜流が影響する場所でも群落自体が群落の保全機能を持つことが示唆されている。

長濱ら(2007)によれば、コアマモが分布する底質の粒度組成は砂泥質から砂質の広い範囲とされている。斎藤ら(2015)は、現地の底質に体積比20%の粒径mm以上の製鋼スラグを混入させた実験でも生育に支障がなかったと報告している。また、コアマモ群落内の底質はAVSが周辺よりも高く、群落内底質で有機物などの嫌気分解が卓越しているとの上出ら(2013)の報告のように、底質中に有機物が多く含まれる場所でも生育可能と考えられる。。

コアマモ群落は、桑江ら(1997)が述べているように水槽実験や実海域の調査から擾乱のある場所に分布することが知られている。高山ら(2014)の調査でコアマモ分布場所における波浪による底面せん断力は、0.008~0.012Paであり、コアマモが分布しない場所より大きいと報告している。また、島谷(2007)は、コアマモ分布場所における高波浪時のシールズ数 ϕ が0.5未満としている。

本種の移植技術も開発されつつあるが、越川ら(2007)によれば、コアマモの発芽率は、アマモの50%以下と低く、現状で栄養株移植が殆どである。

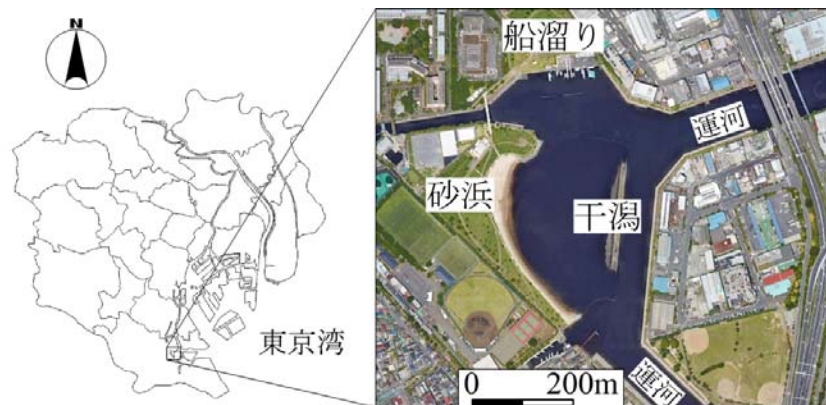
本研究では、将来的に大都市域沿岸人工干潟に海草群落を造成し、将来的に二酸化炭素の吸収源とすることを目指して人工干潟上にコアマモ群落造成を試みた。調査や移植に際しては、地元NPOなどでも対応できるように可能な限り簡素な方法を採用することとした。

V-2-2 コアアモ移植実験

1. 方法

(1) 調査地点

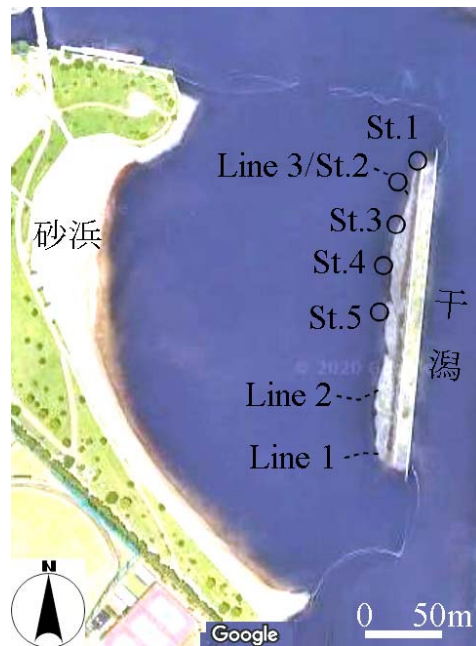
調査対象地点は、図V-2-2 に示す東京都大田区の京浜運河に造成され人工の干潟・海浜・浅場を有する「大森ふるさとの浜辺公園」の干潟部分である。この干潟は、2004年7月に当時近傍に存在していた干潟を移設するかたちで造成され、2012年3月に千葉県君津産の底質中央粒径 $d_{50}=0.2\text{mm}$ 、シルト以下5%未満の山砂を追加覆砂し、干潟の潮間帯上部に多孔質のスコリアが散布され、図V-2-3 に示すようなミオスジやタイドプールなどの微地形が整備されている。



図V-2-2 調査地点（東京都大田区大森ふるさとの浜辺公園）位置図



図V-2-3 人工干潟の状況



図V-2-4 干潟に設定した調査地点

大森ふるさとの浜辺公園の干潟海浜部の開口部は、北側開口部が約 180m、南側開口部が約 70m である。北側開口部の北側約 100m には、遊漁船などが利用する船溜まりがある。この干潟にコアマモを実験的に移植し、生育可能な場所を見出し、その条件の抽出を試みた。

(2) 生育可能地盤高の検討

コアマモは潮間帯下部に生育する。現地における最適な生育地盤高を調べるため、実際にコアマモの株を移植して、その生残状況から最適地盤高を判断した。調査対象干潟に図V-2-4のように Line 1～Line 3 の 3 側線を設定し、側線上に潮下帯の A.P.-0.2 m、L.W.L.の A.P.±0.0 m、および潮間帯の A.P.+0.2m、0.4m、0.6 m の 5 地盤高を設定した。

移植元のコアマモを移植先の土砂を入れた直径 5cm のジフィーポットに 1 株ずつ配置したものを各 3 個、干潟表面に穴を掘って各地点に配置した。移植後、約 1 か月ごとに生残株数と葉の状況を目視観察した。



図V-2-5 コアマモ移植元の群落（港湾空港技研干潟実験施設）

移植元のコアマモは、図V-2-5 に示す港湾空技術研究所の干潟実験水槽内に自生している株を用いた。この干潟実験施設には千葉県の盤洲干潟の土砂が用いられており、このコアマモ群落は、土砂の中に埋在していた種子が発芽して形成されたと考えられている。

地盤高の設定は、東京都港区芝浦の東京港建設事務所船溜内で観測された毎分の潮位情報を用い、水面の高さから地盤高を特定した。

(3) 平面分布およびコアマモの生長状況の検討

干潟は平面的に環境変化があると考えられた。そこで、大森ふるさとの浜辺公園の干潟部分のうち、2017年に明らかにしたコアマモ生育可能地盤高に図V-2-4に示したように約30m間隔でSt. 1からSt. 5の5移植地点を設定し、各地点のコアマモ生残状況および生育状況を観察した。

移植コアマモは、2017年度同様、港湾空港技研干潟実験施設に自生した群落の株を用いた。移植方法は、ポット式に加え、コアマモの地下茎部を移植場所の底質および流出防止の礫をガーゼおよび市販の木綿製出汁袋で保護して、地下茎部を干潟に埋設した。

各調査地点に目印ブイとピンを設置し、調査時に20cm×20cmの調査メッシュをテンポラリーに配置して、移植時の位置決め、および観察時の移植株の識別

に用いた。2018年4月19日にコアマモを移植して、2018年9月7日まで約1か月ごとに各地点のコアマモ生残状況と生育状況を観察した。観察時にスケールを設置した白色板上に各1株のコアマモを載せて、刷毛を用いて葉を伸ばし、これを写真撮影した。この写真より各メッシュ内のコアマモの株数、分蘖数を読み取った。また、撮影したデジタル映像より画像処理ソフト「imageJ」を用いてコアマモの葉長と葉面積を計測した。

2. 物理条件の検討

(1) 地形および地盤条件

コアマモを移植した干潟を含む大森ふるさとの浜辺の地形状況については既存の深淺測量図を用いた。この地形データは、波高分布計算に用いるために5mピッチのデータに変換している。また、コアマモ移植部分の詳細な地盤高について、生存地点と消滅地点各1側線についてレベル測量を行った。

地盤高の基準は、東京港内で工事などに通常用いられるA.P.（荒川工事基準面、Arakawa Peil）を用いた。多くの海域で使用され、標高の基準でもあるT.P.（東京湾平均海面、Tokyo Peil）とA.P.との関係は、 $T.P. \pm 0m = A.P. + 1.13m$ であり、 $L.W.L. = A.P. \pm 0m$ 、 $H.W.L. = A.P. + 2.1m$ 。なおT.P. $\pm 0.0m$ はM.W.L.に相当する。

干潟上でコアマモが生残および死滅地点の地盤条件の相違を検討するために、それぞれ1地点でコアマモ移植地点至近の粒度分析（JGS0131）、密度（JISA1202）、含水比（JISA1203）、強熱減量（JISA1226）および定水位透水試験（JISA1218）を行った。また、潮位変化に合わせた干潟表面の含水比の測定の場合には赤外線法による含水比測定を行った。

(2) 堆積物

セディメントトラップをコアマモ移植範囲に設置して、堆積物の堆積傾向を調

べた。直径 5 cm のサンプル容器に長さ 20cm の VU50 塩ビパイプを取り付け、開口部が L.W.L.に位置するようにして、各地点に 3 セット配置した。24 時間あるいは 48 時間の設置後、サンプル容器内容物をろ過した後乾燥重量を計量した。堆積物量は 24 時間当たりで表した。

(3)波浪状況

コアマモ移植場所を含む大森ふるさとの浜辺公園は、干潟面に対する最大吹送距離が南南東方向からの場合 250m、北北西方向からの場合 300m と短いため、風による波浪が大きくなり難い。一方、調査地点至近には、遊漁船などの船溜まりや運河があり、干潟に作用する波浪として船舶航跡波の影響が大きいと考えた。この船舶航跡波については、干潟周辺の杭や土留堤などの構造物、あるいは干潟汀線付近に配置した 5cm 間隔に目印テープを巻いた棒を立て、船舶航跡波が作用するときの状況を動画に撮影し、波高、周期を目測にて概略計測した。また、ここで得られた波高、周期、および干潟周辺の地形データを用いて、エネルギー平衡方程式による波高・周期の再現計算を行い、今までのコアマモ移植地点前面に作用する波浪条件を算出した。

3. 結果

(1)地盤高

2017年6月7日に干潟に設置したコアマモのうち、9月まで生残していたのは表V-2-1に示すように A.P.+0.4m のみであった。このため、大森ふるさとの浜辺

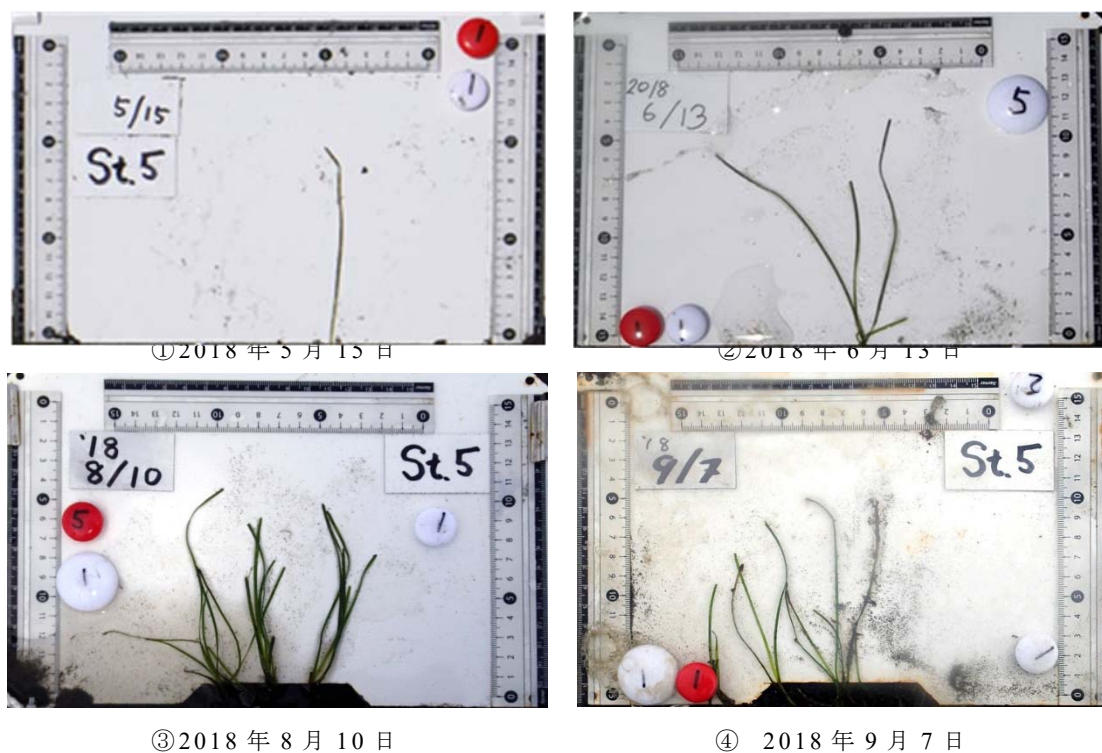
表V-2-1 地盤高別生残株数

観察日 地盤高 \ Line	2017/6/7 (設置)			2017/6/27			2017/8/27			2017/8/19			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
A.P.+0.6m	3	3	3	2	3	4	3	0	0	0	0	0	0
A.P.+0.4m	3	3	3	3	3	3	3	2	3	0	1	1	
A.P.+0.2m	3	3	3	4	3	3	1	3	1	0	0	0	
A.P.±0.0m	3	3	3	3	4	1	0	0	0	0	0	0	
A.P.-0.2m	3	3	3	3	0	1	0	0	0	0	0	0	

公園の干潟でコアマモ生育可能地盤高は A.P.+0.4 m 付近と判断した。

(2) 平面分布および生育状況

干潟平面上の図V-2-4 に示した A.P.+4.0 m 地点に 2018 年 4 月 18 日にコアマモを移植した。各観察時のコアマモ移植苗の生育状況を図V-2-6 に示す。また、各地点の移植方法別コアマモ株数の時系列変化を図V-2-7 に示す。

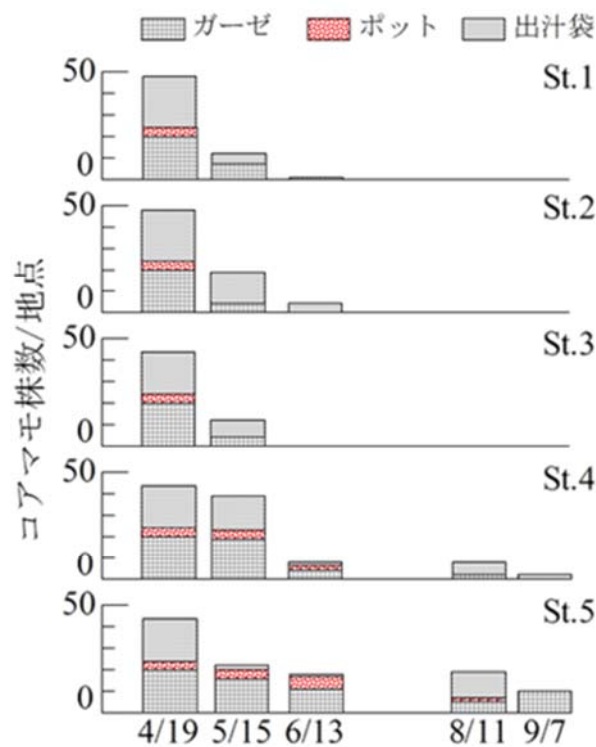


図V-2-6 移植コアマモ生育状況の写真撮影結果 (St. 5)

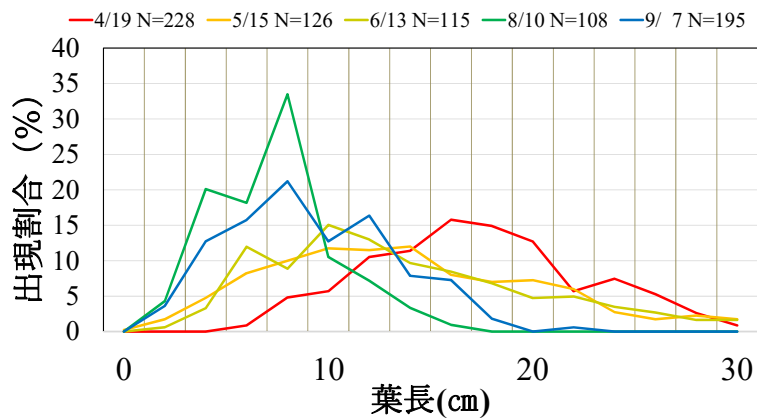
全ての地点で移植後急激に株数が減少し、9月まで生残したのは St. 4 と St. 5 のみであった。また、ポット式およびガーゼや木綿製出汁袋で地下茎を包んだ移植方法別の生育状況については明確な傾向が認められなかった。

各地点でのコアマモの葉長は、図V-2-8 に示すように時間経過と共に短くなる

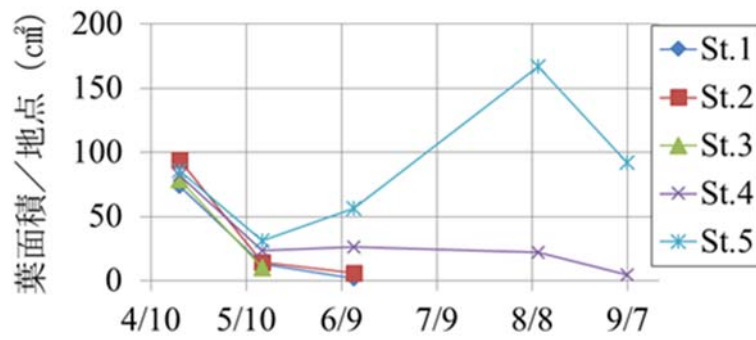
傾向が認められた。コアマモの葉長は短縮していったが、残存していたコアマモは調査期間中分蘖し、図V-2-9、図V-2-10 に示すように葉面積を増やしていた。特に、St. 5 では、8月の時点で初期の葉面積よりも多くなり、1株あたりの葉面積が4倍に達した。9月7日の調査時にコアマモ株が残存していた St. 5 では、図V-2-11 に示すように残存10株中9株に開花していることが確認された。



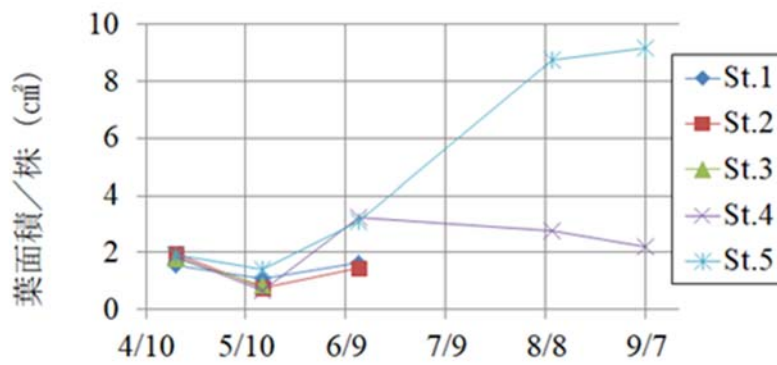
図V-2-7 各地点別残存株数



図V-2-8 各地点別葉長分布



図V-2-9 各地点別葉面積



図V-2-10 地点別1株当り葉面積



図V-2-11 2017年9月7日に St. 5 で確認された開花

(3)物理環境

①地形および地盤条件

St. 5 では移植場所陸側の干潟面には図V-2-3 に示すようなタイドプールが形成されていたが、60m 離れた St. 3 ではタイドプールが見られなかった。コアマモ

移植地点に対して、干出時にタイドプールからの水分滲出が考えられたので、両地点の粒度組成、有機物量および透水性を比較した。

両地点の透水係数（15℃）は、移植コアマモが消失した St. 3 で 9.75×10^{-5} m/s、残存した St. 5 で 8.7×10^{-5} m/s であり、両地点の地盤の透水性が同一オーダーであった。底質粒度組成は両地点で中央粒 $d_{50} = 0.23$ mm、底質密度 $\rho_s = 2.73$ t/m³ と同様であったが、細粒分含有割合が St. 3 の 1.42% に対して St. 5 で 2.10% とやや高かった。強熱減量についても St. 3 での 3.5% に対して St. 5 で 7.3% とやや高かった。

② 堆積物

調査期間中 5 回のセディメントトラップ調査を行った。図 V-2-12 に示すように、各調査時に堆積物量は変動するものの、干潟の奥側に向かう（起点からの距離が増大する）につれて堆積物量が増大する傾向は確認できず、干潟全体ではほぼ同様な堆積状況であったと考えられる。

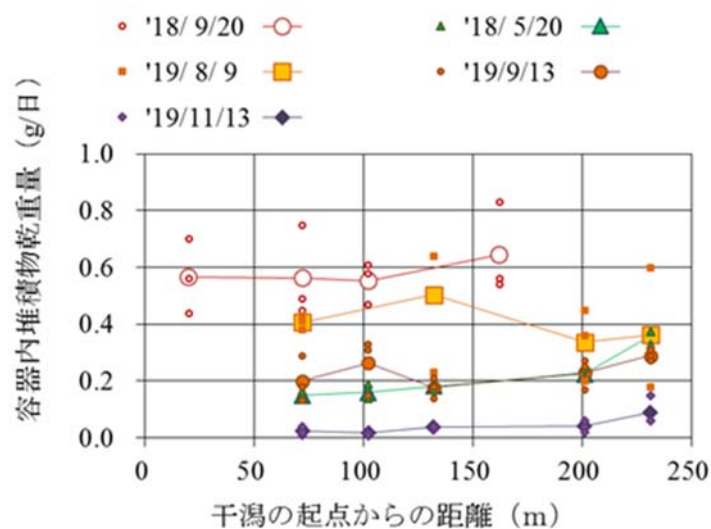


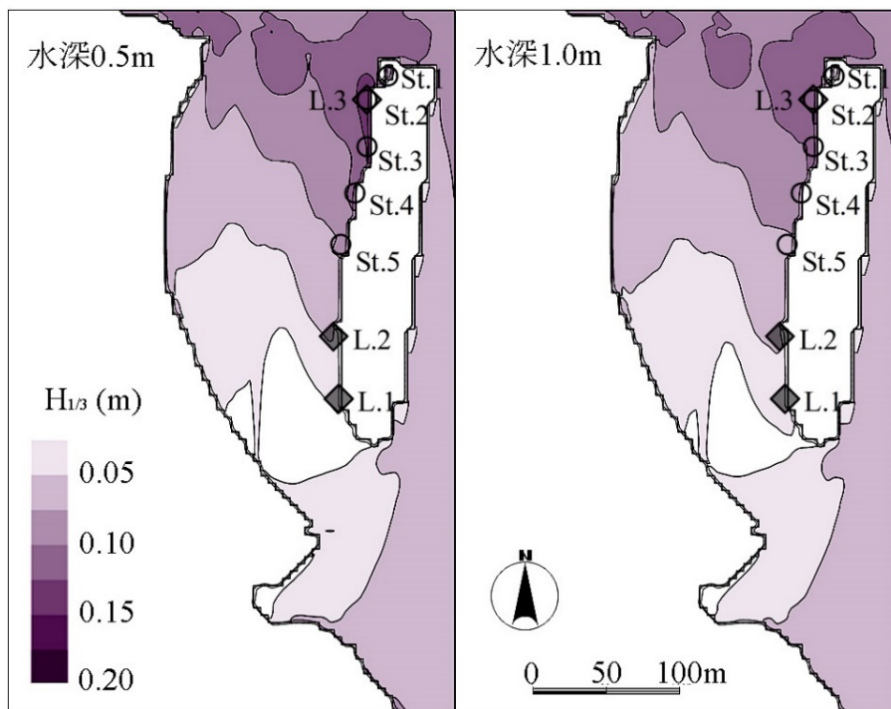
図 V-2-12 セディメントトラップの結果

③波浪状況

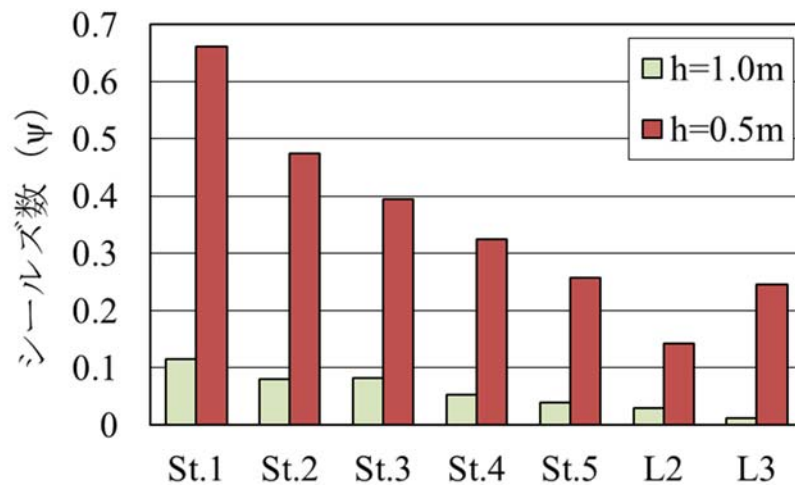
当該海域北側の船溜まりには常時7～10隻の釣り船などの小型船舶が稼働している。これらの船舶は朝夕に入出港する。隣接する京浜運河においては1時間に1～2回程度パトロール船などの航行がある。これらの船舶航行時に波浪は、干潟入り口で北方向から入射し、その波高が約0.1 m、周期が干潟の北側入り口付近で12秒程度であった。

ここで、観察された波浪条件を用いて、エネルギー平衡方程式により入射波ベクトル、最大波高、有義波高、周期の再現計算を行った。

図V-2-13に示すように北側から入射した波浪は、海域の南側に向けて減衰していく。また、計算水深 $h=1.0$ m (M.W.L.に相当) および $h=0.5$ m (コアマモ移植水深に相当) の条件で図V-2-14に示すように2017年と2018年にコアマモを移植した場所のシールド数 (ϕ) を算出した。



図V-2-13 波高分布再現結果



図V-2-14 各地点のシールズ数

シールズ数は、干潟の北側開口部の波除堤の背後が最も大きく、干潟中央部へ向かうにつれて低下する傾向が認められた。また、水深が小さいときに数値が大きくなる傾向が顕著であった。

V-2-3 結果および考察

本研究では、人工干潟の潮間帯部分へのコアマモ群落造成を目指して、先ず生育可能地盤高の把握を行い、次に地盤条件や波浪条件を検討した。しかしながら、今回の検討範囲では群落造成に至らなかった。

今回、海草群落に通常作用する最大クラスの波浪としての船舶航跡波について動画撮影や目視観察という簡易な方法で測定した。波高分布には数値計算を用いたが、これは干潟上に人数を動員して目視観測することで評価できる。底質は分析が必要であるが、海草の試験的な移植による生残判定や生育状況観察により、市民活動レベルでも海草群落造成の計画や評価ができるものと考えた。

この公園では、地元NPOがL.W.L.付近にアマモの移植実験を行ったが、その生育が確認されなかった。しかし、干出しても生育可能なコアマモは、潮間帯に

位置する L.W.L.上 0.4m 付近が分布可能地盤高であることが明らかとなった。コアマモが 9 月まで分布した地点と移植直後に消失した地点の比較では、残存場所の方が強熱減量とシルト以下含有割合が高かったが、地盤の透水性は同様だった。

波高分布再現計算からもコアマモ消失場所は残存場所よりも波高が高く、シールズ数も大きい傾向が認められた。計算水深 $h=0.5\text{m}$ のコアマモ移植場所の水深が 10cm の時に航跡波が作用すると、シールズ数 $\phi > 0.5$ と計算された場所も見られた。航跡波は持続的に作用するわけではないので、航跡波によってコアマモ移植場所の底質移動がシートフロー状態になり、コアマモ株が浮力に負けて浮上流出することは想定し難い。しかも、船舶航跡波は、常時連続的に発生するわけではなく、船舶が通過した際に数 10 秒程度継続する程度である。

島谷(2007)によれば、コアマモの分布場所は、高波浪時のシールズ数 $\phi < 0.5$ の状態が 60%未満の場所と報告している。この時の波浪は、常時 0.38m、高波浪時に 1.98m であったが、大森ふるさとの浜辺公園の高波浪は 0.1m に過ぎなく、他の地点の高波浪に比べてはるかに小さい。このように、小さな波浪でも潮位が低く波浪が底質に影響を及ぼしやすい条件である場合には、底質を擾乱させ地下茎が露出する状態になれば、コアマモが流失すると考えられる。

コアマモの生残が確認された場所は、シールズ数 $\phi < 0.3$ の地点で底質移動が浮遊から掃流状態である。コアマモが浮上しない程度に底質や堆積物を移動させる条件がコアマモ分布に適していたことになる。

コアマモ生残地点と消失地点で強熱減量やシルト以下割合に差が認められた。しかし、堆積物は干潟全体でほぼ同様であったことから、生残地点では、底質移動がシートフローにならないシールズ数 $\phi < 0.5$ の範囲であり、かつ航跡波により細粒分や有機物が掃流されるという条件がコアマモの生育に適切であった可能性がある。

V-3 ウミシヨウブへの適用

V-3-1 はじめに

熱帯性海草ウミシヨウブ *Enhalus acoroides* は、石垣島と西表島の周辺海域が分布北限であり、環境省RDBにおいて絶滅危惧II類に掲載されている。本種は西表島各地で群落の衰退がダイバーなどから指摘された。本種の明確な記録として中村(2010)は、西表島北西部の網取湾などでかつて大規模な群落が存在していた場所での群落衰退・消失を報告している。大場・宮田(2007)によれば、ウミシヨウブは、インド洋から太平洋西部の熱帯と亜熱帯の沿海に分布する海草である。我が国において、石垣島では稀に、一方西表島では全島に普通に見られる。ウミシヨウブの分布場所は、大潮の干潮時の水位が30cm以上の場所である。地下茎は、長さ5～6cmで斜上し、枯葉基部の遷移に厚く覆われ、直径2～3cmである。根は白色で太さ3～5mmで密につき分岐しない。葉は、地下茎の先端に集まり、4～6枚、広線形で長さ40～150cm、幅1～1.5cmである。西表島網取湾の東海大学栈橋付近のウミシヨウブの単独群落の状況を図V-3-1に示す。



図V-3-1 ウミシヨウブ単独群落の状況

当間(2012)が述べているようにウミシヨウブは、水上受粉が特徴であり、夏季6月～9月の大潮の日中の干潮時に開花して雄花を放出し、海面に浮上した雌花が捕らえて受粉する。受粉後、雌花の茎は、縮んで海中に戻り直径3cm程度の果実を結実する。また、村上ら(2015)および水谷ら(2019)の研究では、受粉の約2.5ヶ月後に果実から種子が放出され、短時間浮遊した後、海底に沈下し発芽に備えると報告している。このため、ウミシヨウブは、8月～12月まで種子が海底に配置され、夏期に発芽が確認されるようになる。

ウミシヨウブは、種子分散で群落を拡大していると考えられている。成熟し、複数の種子を擁した果実は、短時間浮上した後に沈降する。種子の分散力は、村上ら(2015)の流況再現計算によるウミシヨウブ種子の平均移動距離の評価では、分散距離がその群落サイズとほぼ同等程度と判断された。このことは、中島ら(2013)によるフィリピン北西海域のウミシヨウブ群落におけるマイクロサテライトマーカーを用いた群落内外での集団遺伝学解析で15kmスケール内の地点間で群落構成個体の遺伝的分化が大きい、即ちこのスケールの範囲内で各ウミシヨウブ群落が相互に交雑することなく遺伝的に分化していることを示している。このため、本種の種子・果実などの長距離分散の頻度が低いと判断されるとの指摘からも裏付けられる。

分散性の乏しい本種の群落を保全することを考えるためには、現在の分布状況や生育環境条件の関係について明らかにする必要がある。しかし、本種の分布に関わる条件については、海中光量や土砂の堆積についての報告があるものの、波・流れの状況より評価した研究例は少ない。ウミシヨウブ群落と流れとの関連の研究は、Rollón (1998)によるフィリピンのウミシヨウブ群落で浮遊物を漂流させて流速を測定した事例、およびKomatsu *et al.* (2004)によるタイのウミシヨウブ群落で石膏球法（流れの場に石膏球を配置して、流れによる浸食量を石膏球

の重量減少量より評価する方法) を用いた流速分布の測定事例くらいである。

ウミシヨウブは、沿岸の砂泥域から礫質の海底に分布している。このことから、アマモ同様に波浪などの物理条件がその分布に影響していると考えられる。そこで、本研究では、既存の西表島北西部の群落分布現地調査結果によるウミシヨウブ分布と数値計算モデルによる波・流れに関連する物理的条件の平面的分布の数値シミュレーションによる再現計算結果とを直接比較し、波浪などの物理力より本種の群落分布条件を抽出することを試みた。数値計算による波高など外力の分布とウミシヨウブ群落分布の比較は竹山ら(2014)でも行われたが、ウミシヨウブの分布と波高などの物理的パラメータとの定量的比較をしていない。

そこで、本研究では、ウミシヨウブの分布と物理的条件の比較において、アマモの場合と同様にウミシヨウブ分布を波・流れなどの数値計算メッシュに当てはめ、メッシュ毎のウミシヨウブ群落の有無と物理的データを直接比較した。

西表島北西部は、冬季に季節風の影響で波向・風向が殆どNE~NNE方向から作用し、北限のウミシヨウブ分布に冬季の条件が大きく影響すると考えた。そこで、冬季の季節風が連続的に長時間作用する典型的気象条件を入力条件として波高などの物理的外力の平面分布を再現計算し、これを用いてウミシヨウブの分布条件の抽出を試みた。また、これらのウミシヨウブ分布の比較に用いた各物理的条件のどの組み合わせが本種の分布を説明する上で適切かについてロジスティック回帰分析手法を用いて評価した。

さらに、ウミシヨウブ分布に及ぼす影響については、本種が分布する南西諸島の特性として毎年一定期間持続する季節風による高波浪状況に加え、台風などの一時的で大きなイベントの影響があると考えた。そこで、ロジスティック回帰分析により抽出した物理条件の組み合わせを用いて調査海域における1年間を通じた波や流れの再現計算を行い、どの時期のどのような外力条件がウミシヨウブ群

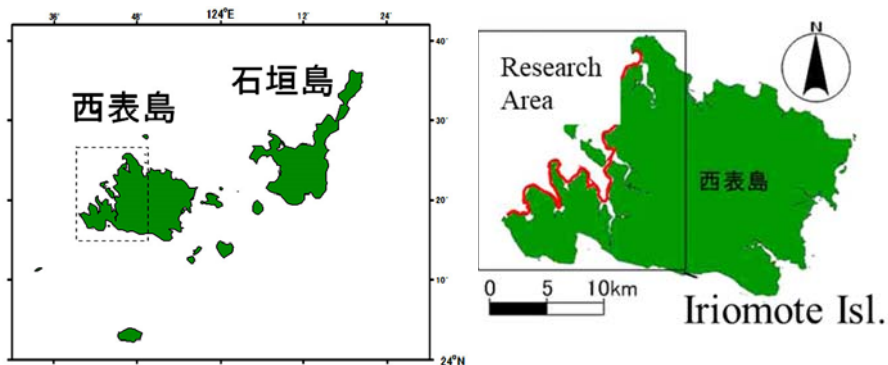
落分布を決定するかについて検討した。

V-3-2 調査方法

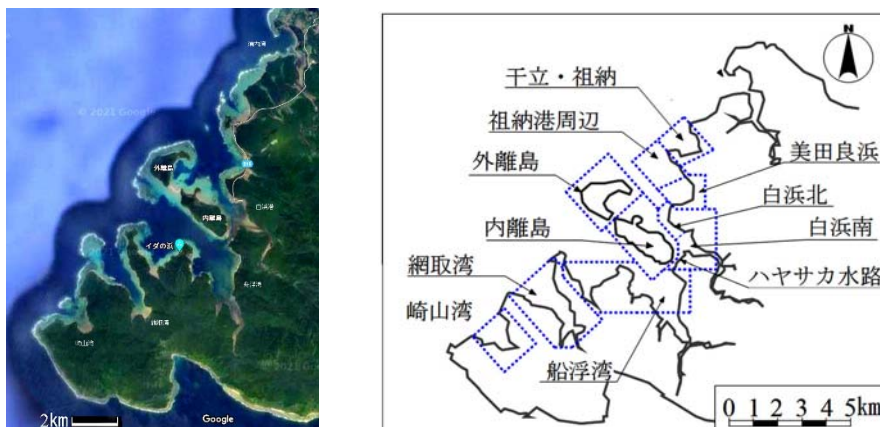
1. 調査地域

調査範囲は、**図V-3-2**に示す西表島北西部の浦内湾から崎山湾に至る海岸線延長45kmにのぼる海域を対象とした結果を用いた。この地域は、**図V-3-3**に示すようにサンゴ礁のリーフが発達し、かつ水深の大きな湾入部が多く地形が複雑であるため、海域に名称を付けて識別した。

この海域のウミシヨウブ分布に関する情報は、竹山ら(2014)が報告した東海大学沖縄地域研究センターの2013年調査による分布実測結果、および環境庁

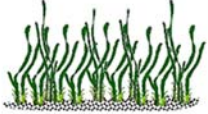
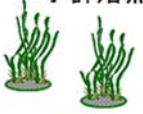



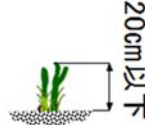


図V-3-2 調査範囲



図V-3-3 地形および海域名称

表V-3-1 ウミシヨウブ群落状況評価基準（竹山ら 2014）

密度	 密生	 小群落点在 疎生	 株点在 点生
葉長	 長い	 短い	 極端に短い

(1997)に著された1989年に同海域で実施された海草群落分布を用いた。

竹山ら(2014)が報告したウミシヨウブの分布調査では、2013年7月～10月に図V-3-2に示した調査範囲の沿岸部に観測者を船舶などで曳航するマンタ法を用いたライントランセクト、表V-3-1に示す基準による群落状況の記録、および密生群落分布範囲外周のGPSによる座標特定を行っている。この情報を後述する物理的外力の再現計算の格子である50m×50mメッシュに表記した。

環境庁(1997)による海草分布調査結果は、環境庁が1989年に同海域で実施した調査に基づくものであり、空中写真から群落分布域を読み取ったものである。なお、空中写真よりの読み取りでは、現存群落の面積が過大評価される傾向があり、構成種が不明な場合もあるとしている。これらのデータも物理的条件の再現計算と直接比較検討するため、再現計算の格子である50m×50mメッシュに群落の有無を表記した。なお、メッシュ内の50%以上の面積に群落が確認された場合、そのメッシュは「群落有り」とした。

2. 分布場所の外力再現計算

ウミシヨウブも沿岸浅海域の砂礫、サンゴ礫、および砂泥域に分布しているので、アマモと同様に群落分布は、波浪や潮流そのものやそれらの作用による底質

の浸食、堆積といった底質安定性などの物理的要因により、その分布が影響されることが考えられる。

沿岸の物理的現象として最大級のものは波浪である。波浪は、海草の草体に直接働くだけでなく、これにより生じる底面流速が海底の底質粒子に作用し、浸食・堆積を引き起こして海草の地下茎の安定性を左右する。

海草群落の分布には「潮通し」も影響することが考えられる。これを表すパラメータとして潮汐残渣流速を用いた。潮汐残渣流速は、潮汐の影響がある海域で潮流が停滞的か、あるいは一定方向を持って水塊が移動するかを表し、間接的に粒子の堆積性を評価し得るものである。潮汐残渣流速は、潮流の速度でなく、張潮と落潮との流速の差を示し、この値が大きいほど水塊が方向性を持って移動していることを示す。

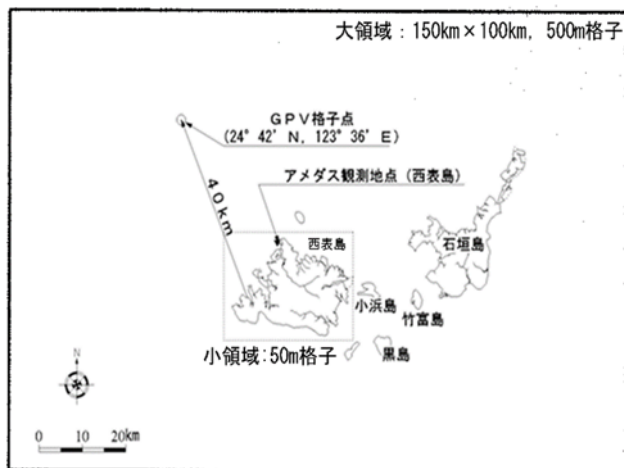
アマモ場成立条件の抽出と同様、これらの数値計算で再現計算された波や流れなどの平面分布とウミシヨウブの平面分布を数値計算の計算メッシュ上で直接比較し、ウミシヨウブの分布条件の抽出および分布の再現を試みた。

なお、ここでは、アマモ分布の評価に用いたシールズ数を用いていない。西表島のウミシヨウブはサンゴ砂を含む底質に分布している。しかし、シールズ数は本来砂を対象のパラメータであり、粒子の直径が数mm以上で不定形な形状のサンゴ破片を含むサンゴ砂にシールズ数を適用することは不相当と判断した。

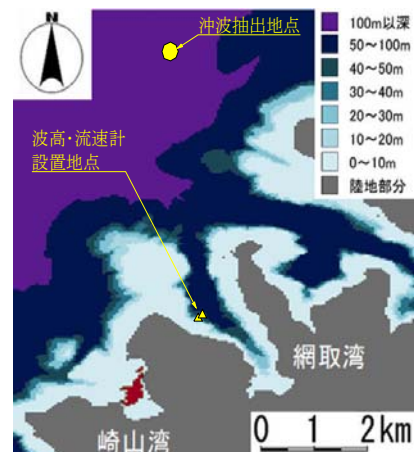
3. 再現計算の方法

西表島北西部のウミシヨウブの分布環境を検討するために、広領域として図v-3-3①に示す石垣島から西表島を含む 150km×100km の計算領域を設定し、沖合で 500m×500m、沿岸部分で 50m×50m の計算格子を設定して、数値計算による外力条件の再現計算を行った。

計算領域内の波高分布および底面流速の再現計算は、Booji *et al.* (1999)に計



① 計算領域および GPV、アメダス地点



② 計測器設置地点および沖波抽出地点

図V-3-4 計算領域および計測機設置地点

算方法の詳細が述べられている波浪モデル SWAN を用いて算出した。なお、平均底面流速は、振動流速振幅の二乗平均平方根であり、期間中の実質的振幅最大値を示した。

計算には、気象条件を入力条件として計算範囲内の1時間毎の波高および底面流速の平面分布を求めた。この気象条件としては、図V-3-4①に示す気象庁アメダス西表観測地点および気象庁沿岸波浪数値予報モデルGPVのデータを用いた。GPVのデータは日本とその近海を5kmの水平格子間隔でカバーしている気象庁MSM（メソモデル）で算出されているが、ここでは調査範囲の網取湾北北西沖40km地点に位置する地点を採用した。

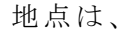
潮汐については、大潮時の潮汐条件を用いて村上ら(2004)による海洋モデルCCMを用いて潮汐残差流を計算し、各計算メッシュに計算期間中の潮汐残差流速の平均値を表した。計算結果の沖波代表地点は、図V-3-4②に示す水深100m以上が確保され、地形による波浪変化が無いと思われる場所とした。

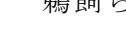

なお、波高とGPVの検証を行うため、鵜飼ら(2010)は、2008年7月～2009年10月までの15カ月間の自記式波高・流速計を図V-3-4②に示す水深10mおよび

20m地点に設置して、波高・流向・流速の連続観測を行っている。

4. 冬季波浪条件

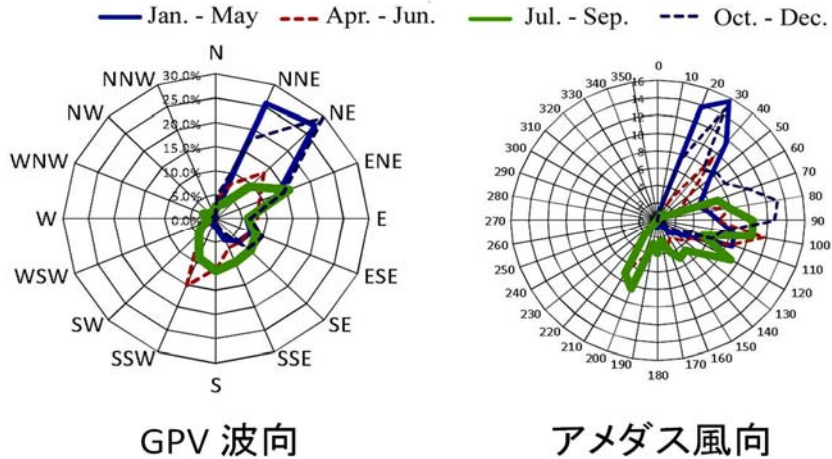
中村(2010)は、八重山諸島の海中の植物群落分布を制限するのが主に冬季の北東からの風と夏季の南西の風の影響による海底砂の攪乱によると述べている。調査海域がウミシヨウブの地理的分布における北限であること、および長期的なウミシヨウブの分布への影響を考慮すると、台風などの不定期で一時的なイベント以上に日常的かつ連続的に作用する波浪や流れなどの物理環境が大きく影響すると考えられた。そこで、連続的に長時間作用する外力として冬季季節風作用時の条件を用いた。

波浪の現地観測には、鵜飼ら(2010)による西表島西部の網取湾内で 2008 年 7 月～2009 年 10 月までの約 15 ヶ月間の連続測定結果を参考にした。計測器設置地点は、V-3-4②に示す湾内の外洋から入射する高波浪の観測が期待できる部分であり、水深約-10m および-20m の平坦部分としている。この地点にそれぞれ自記式波高・流速計を設置し、毎正時 20 分間の水位、水圧、流速 2 成分について連続測定した。また、計測値と比較する沖波条件としては、波高計設置場所沖合約 40km 地点の 3 時間毎の気象庁 GPV データを用いた。

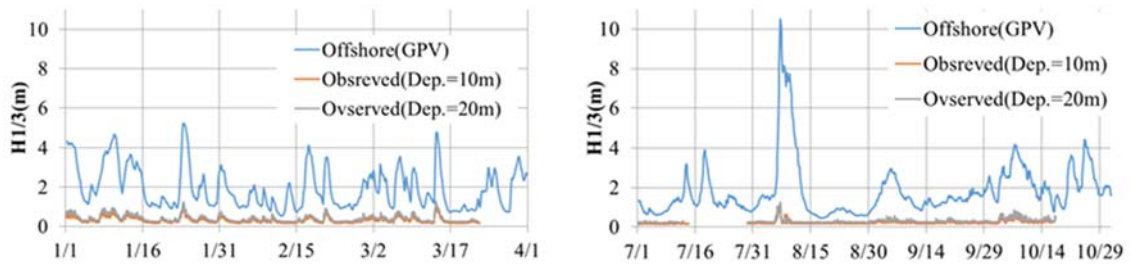
鵜飼ら(2010)の計測によれば、V-3-5 に示すように西表島北西部は年間を通じて NNE～NE の沖波及び風向が卓越し、特に冬季に殆どが NNE～NE 方向からの波・風向が連続して作用することが明らかである。沿岸での波高計測結果と沖合の GPV データとは、V-3-6 のようによく整合しており、再現計算を行う場合の入力条件として使用することが適当であることが明らかである。

冬季波浪の入力条件は、竹山ら(2014)による再現計算結果を用いた。この計算の入力条件は、2012 年度のアメダス西表島観測地点の冬季 12 月～3 月の風向風速データより抽出した典型的な冬季の条件として 2013 年 1 月 14 日～1 月 18

日のアメダス風況データと気象庁 GPV による気象海象データを用いている。



図V-3-5 鵜飼ら(2010)による調査海域の年間の波向と風向頻度



図V-3-6 鵜飼ら(2010)による 2008 年～2009 年の波高測定結果と GPV データ

この条件を用いて波浪モデル SWAN を用いて計算領域内の有義波高と底面流速平面分布を再現計算した。また、潮汐残差流は、海洋モデル CCM を用いて 2012 年 12 月 30 日～2013 年 1 月 4 日間の平面分布の再現計算を行った。

5. 最も影響のある要素の抽出

冬季高波浪条件を用いてウミシヨウブ分布と比較したパラメータは、水深および再現計算による波高、底面流速、潮汐残差流速である。これらのうち、ウミシヨウブの分布を説明する上でどのようなパラメータの組み合わせがより相関性が高いのかについて、ロジスティック回帰分析を用いて評価した。

ウミシヨウブの分布について、有（1）と無（0）を目的変数とし、水深および各物理的パラメータを説明変数とした。説明変数の組合わせは、回帰式がウミシヨウブの有（1）と無（0）を最も明確に分離するか、および回帰式の当てはめのよさを示すAIC（赤池情報量規準）で評価した。AICは相対的に小さい方が回帰式の当てはめが良いとされる。

6. 月別物理条件の再現計算

ウミシヨウブの分布との関係が強い物理的要素について、2015年1月1日～12月31日の対象範囲の物理的條件について平面分布の時系列は、気象庁MSMデータを入力条件として波浪モデルSWANを用い計算期間中1時間毎に算出した。この計算結果より、各月別の物理状況の状況を検討した。

高波浪条件は、図V-3-4②に示す網取湾口部の北北西沖約5000mの水深117.8mの地点に「沖波波高抽出地点」を設定し、再現計算結果の中でこの地点で有義波高が1m以上であった時点を「高波浪時」として、その状況を抽出した。

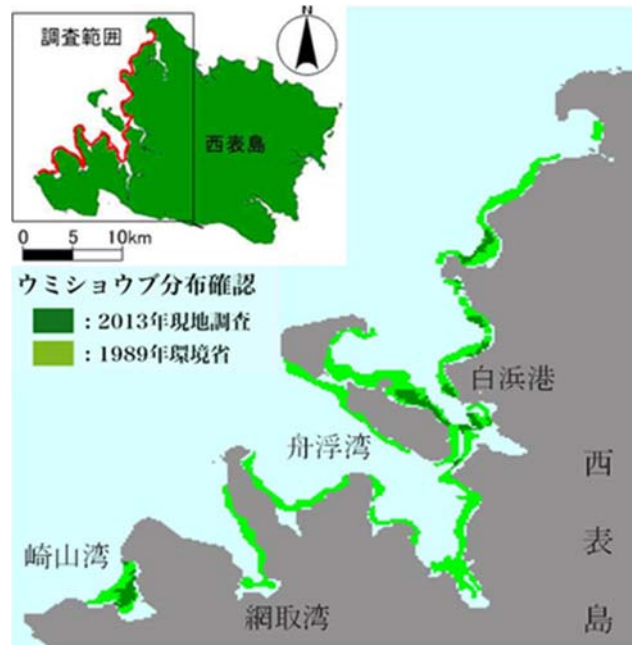
計算範囲内の50m×50mの計算メッシュごとに全計算結果、および高波浪時の計算結果平均値を各月ごとに表現した。波浪モデルSWANでは各メッシュ上で1時間当たりの波高と底面流速の平均値を出力している。これを月当たり（30日なら720時間）に単純平均し、各計算メッシュの月平均値とした。

V-3-3 現地調査結果

1. ウミシヨウブの分布状況

竹山ら(2014)が取りまとめた2013年におけるウミシヨウブの分布、および環境庁(1997)による海草分布調査結果を図V-3-7に示す。ウミシヨウブは、リーフ内や湾状の場所に分布しており、外洋に直接面した砂浜や礫浜が形成されない場所に分布していなかった。これらのウミシヨウブ群落を50m×50mの数値計算メッシ

ユに当てはめた場合、群落を確認されたメッシュ数は1989年に2715メッシュ、2013年に378メッシュであった。

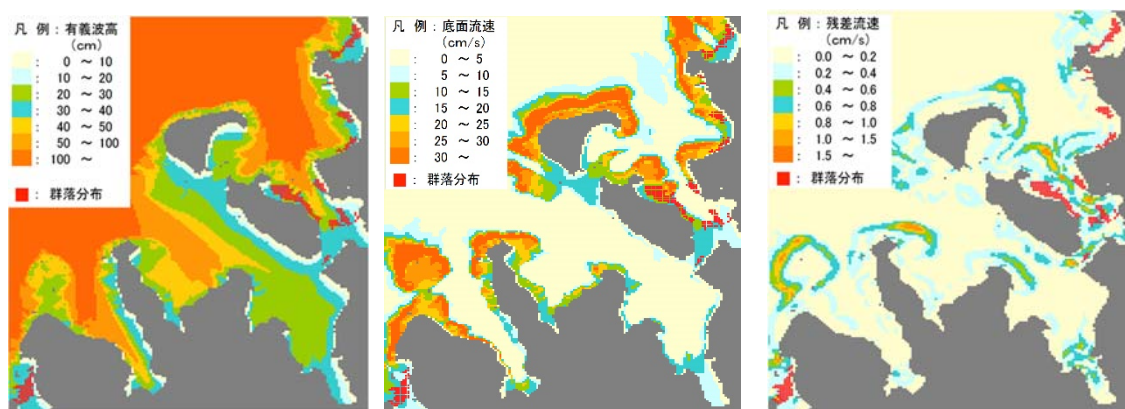


図V-3-7 ウミシヨウブ分布現地調査結果
2013年は竹山ら(2014)、1989年は環境庁(1997)によった

2. 冬季季節風作用時のウミシヨウブ分布条件

(1)再現計算結果

西表島北西岸で冬季に典型的に見られる2013年1月14日から1月18日の波高と



①波高分布

②底面流速分布

③潮汐残差流速分布

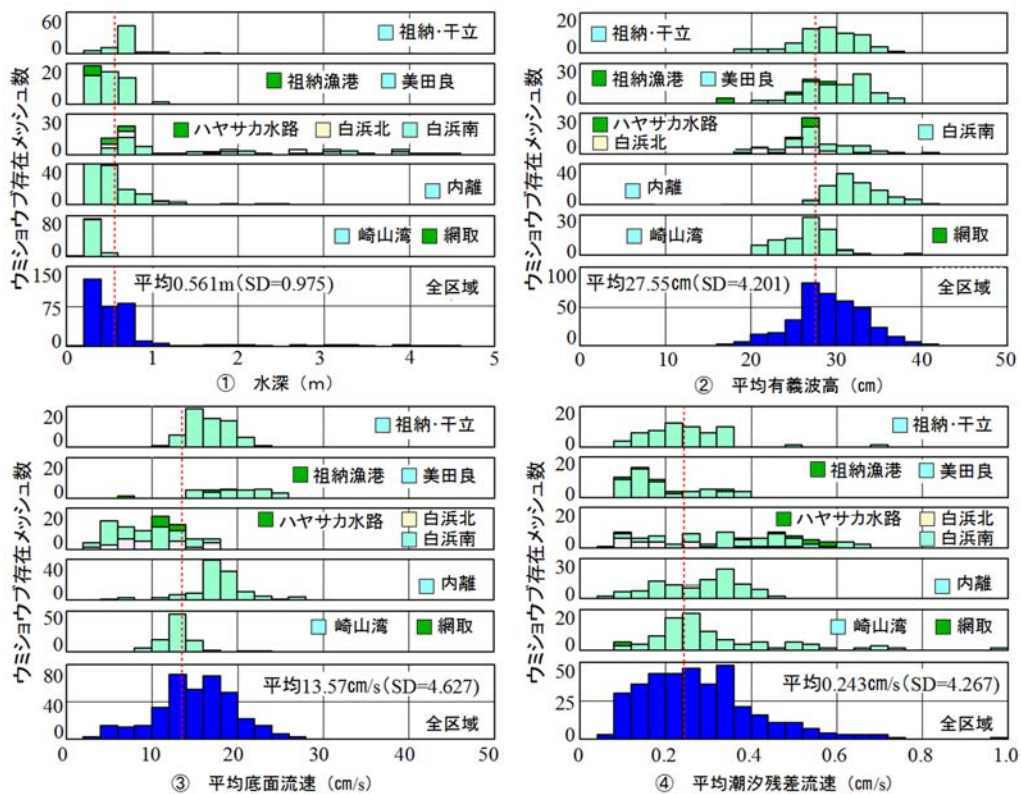
図V-3-8 冬季季節風作用時の平均外力分布再現計算結果

底面流速、および2012年12月30日～2013年1月4日の潮汐残差流速を計算期間内で単純平均した平均値の平面分布を図-V-3-8①～③に示す。

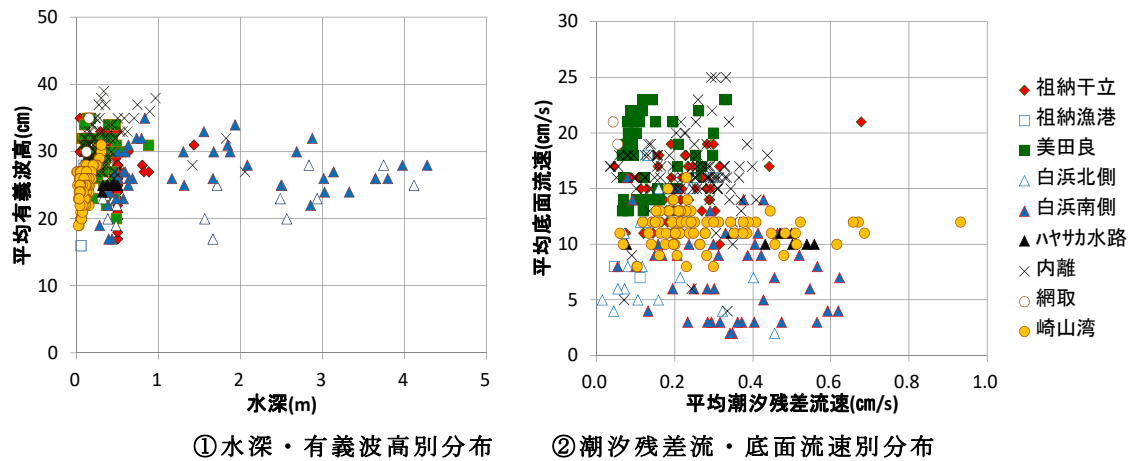
冬季の通常の高波浪時の平均有義波高分布では、沖合からの高波浪が水深10m以下のサンゴ礁縁部分より陸地側に認められず、リーフの存在が波浪低減に役立っていることが明らかであった。平均底面流速は、サンゴ礁縁にあたる部分の水深10m程度の場所で大きく、高波浪がリーフエッジで流れに変化することが窺われた。平均潮汐残差流速は、一般に潮通しが良いと言われる離島間の海峡部や岬およびリーフの先端部沖側で大きくなる傾向が認められた。

(2) ウミシヨウブ分布との比較

各計算メッシュ上のウミシヨウブ分布と物理的情報と直接比較を行った。ウミシヨウブの密生群落分布状況を外力再現計算に用いた計算メッシュに合わせて表



図V-3-9 地点別密生群落の物理条件分布ヒストグラム

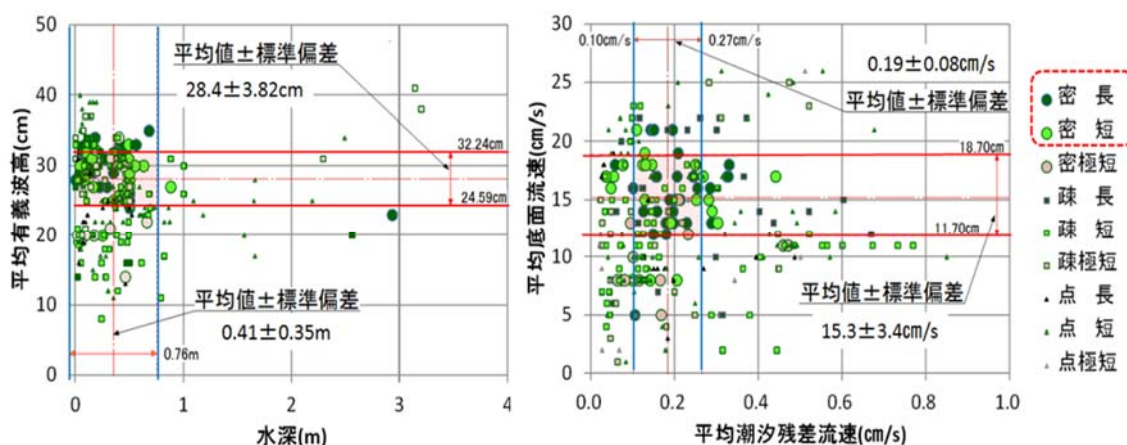


図V-3-10 地点別・物理条件別のウミシヨウブ密生群落分布

記し、各メッシュに水深および再現計算による波高、底面流速、潮汐残渣流速の各階層別出現頻度を評価した。各条件における階級別のウミシヨウブ密生群落確認メッシュ数を図V-3-9のヒストグラムに示す。これにより、ウミシヨウブは、調査地点ごとに密生群落を形成する物理条件の中心的分布範囲が異なる傾向が認められた。

全区域によるウミシヨウブ分布メッシュの各外力条件、および図V-3-3に示した各調査地点別に各外力条件の平均値について*t*検定にて平均値の差を比較した。有意水準 $p < 0.01$ で有意差が認められたのは、水深が白浜地区（全体平均値より深い）と崎山湾地区（全体平均値より浅い）、平均有義波高が内灘（平均有義波高より大きい）と崎山湾（平均有義波高より小さい）、平均潮汐残渣流速が美田良（平均潮汐残渣流速より小さい）とハヤサカ水路（平均潮汐残渣流速より大きい）、平均底面流速において全地点の平均値と全体の平均値が異なっていた。

図V-3-10①に水深をx軸、平均有義波高をy軸にした各地点別のウミシヨウブ密生群落分布のプロットを示す。白浜地区では水深が深い側にもプロットが広がっているが、崎山湾では浅い場所にプロットが集中している。また、図V-3-10②に



①水深・有義波高別分布 ②潮汐残差流・底面流速別分布

図V-3-11 群落状態別・物理条件別のウミシヨウブ群落分布

平均潮汐残差流速をx軸、平均底面流速をy軸にした地点別ウミシヨウブの密生群落を確認されたプロットを示す。それぞれの地点での平均潮汐残差流速は、ほぼ同様な範囲であるものの、平均底面流速範囲が地点ごとに異なっている。

図V-3-10①および図V-3-10②より、ウミシヨウブ群落分布の物理的条件には、地点別に分布範囲に特徴があり、祖納干立、祖納漁港周辺、美田良、内灘のタイプa、白浜港南部、北部のタイプb、およびハヤサカ水路、崎山湾のタイプcのように3タイプがあるように思われた。図V-3-11①および図V-3-10②より、タイプaは、底面流速が大きく残差流速が小さいため、波浪による海水移動が大きい場所と考えられる。タイプbは、底面流速が小さいが、残差流速の大きい部分が多く、潮汐による海水交換の影響が大きいと思われる。タイプcは、両者の中間的状态であると考えられた。

西表島北西部全体を対象として2013年に東海大学が実施したウミシヨウブ群落分布状況調査では、離岸距離約50m部分のウミシヨウブが分布する268メッシュについて表V-3-1に示したウミシヨウブの草丈、被度および群落状況が記録されている。このデータの提供を受け、ウミシヨウブ分布メッシュにおける被度お

よび草丈別の物理条件を抽出した。なお、ここでは疎生や点生群落もグラフ上に表した。

ウミシヨウブの密度が高く草丈20cm以上の物理パラメータ上の散布図中では、一定の範囲にプロットが集中していた。プロットが集中している部分からプロットの分布外縁に向かうと、ウミシヨウブの生育密度が低下し、草丈が短くなる傾向が認められた。また、水深1.0m以深では、草丈が長い群落のメッシュが急減していた。

被度が「密生」かつ草丈が「短」以上（20cm以上）の分布範囲のそれぞれの物理条件の平均値および標準偏差をウミシヨウブ群落の「分布適合範囲」とした。各物理条件のウミシヨウブ群落の分布適合範囲は以下のとおりであった。

水深：0.41±0.35m

平均有義波高：28.4±3.82 cm

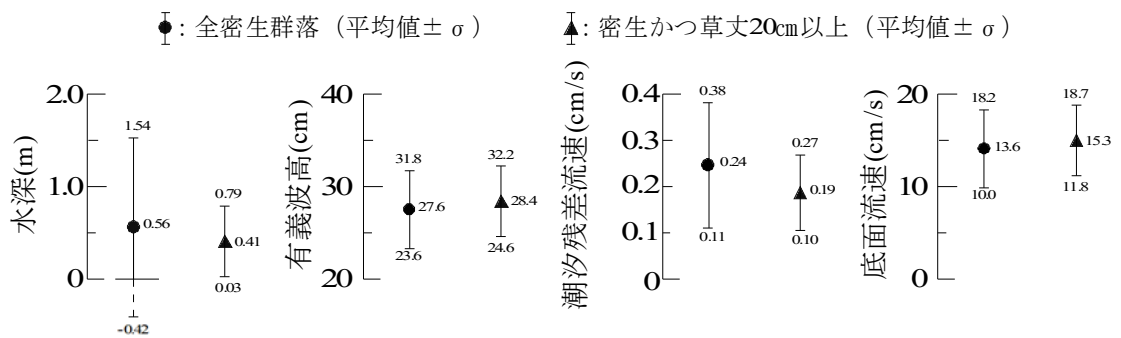
平均潮汐残差流速：0.186±0.082 cm/s

平均底面流速：15.26±3.44cm/s

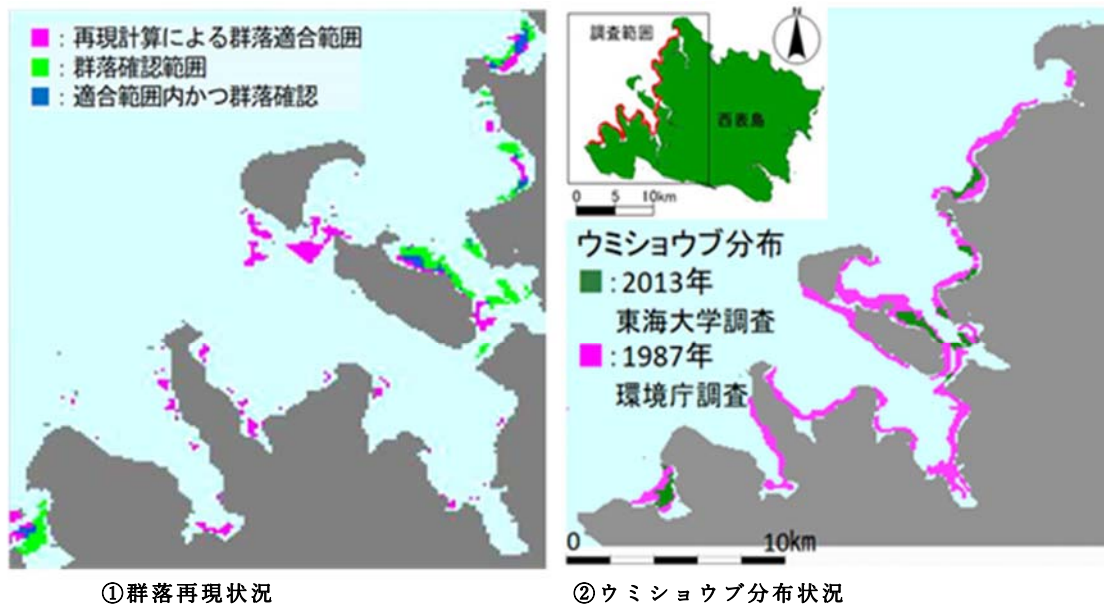
各物理条件の平均値は、密生群落より抽出した場合と全群落より抽出した場合、

図V-3-12に示すように有意差が認められなかった。

図V-3-8に示した水深および平均有義波高・平均底面流速・平均潮汐残差流速



図V-3-12 全密生群落と密生かつ草丈20cm以上の物理条件範囲



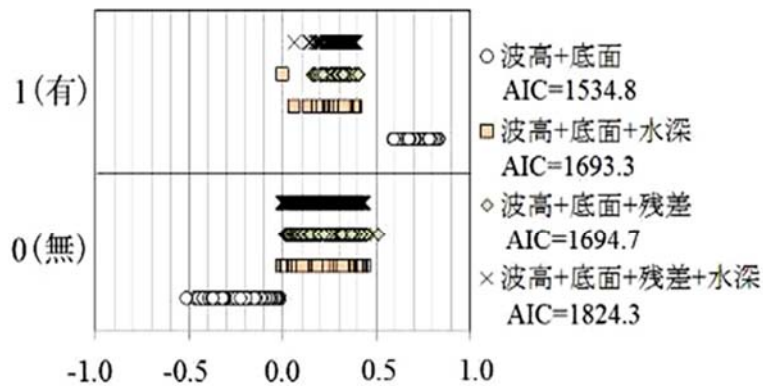
図V-3-13 物理条件より再現したウミシヨウブ分布と分布調査結果

の再現計算結果より、ウミシヨウブ群落の「分布適合範囲」を用いてこの条件に適合する範囲を識別（フィルタリング）してウミシヨウブ分布の再現を行った。この状況を図V-3-13に示す。

水深および再現計算結果よりフィルタリングした「分布適合範囲」は、部分的に現状でのウミシヨウブ密生群落分布範囲を再現していた。また、現状において群落分布が見られないものの、過去に分布が確認された外離島南側や船浮湾湾口部南岸側に分布が再現された。一方、現実には、水深-2~-4mの相対的に深い部分にも群落が確認されている白浜港南側や舟浮湾奥部が適合範囲とされなかった。環境庁(1997)の調査でウミシヨウブ群落分布が確認されていたが、2013年の現地調査時に群落が消滅していた網取湾奥部では、かつての分布範囲の一部が再現計算によるウミシヨウブの分布適合範囲に含まれていた。

2. 評価項目の絞り込み

物理条件の再現計算結果を用いてウミシヨウブ分布を再現する検討では、水深



図V-3-14 ロジスティック回帰分析結果
(底面、残差はそれぞれ底面流速、潮汐残差流速を示す)

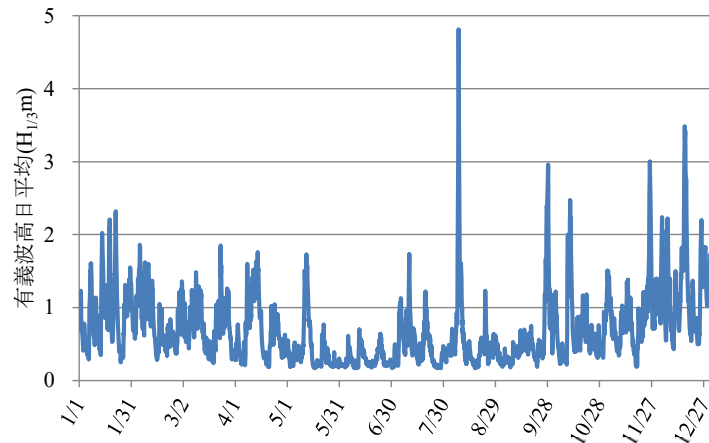
および冬季の平均有義波高・平均底面流速・平均潮汐残差流速を用いてフィルタリングを行った。これらの各物理的要素の組み合わせについて、どの組み合わせが群落の有無を説明するのに最適かについてロジスティック回帰分析を用いて評価した。

ウミシヨウブの分布の有（1）と無（0）を目的変数とし、水深および再現計算による波高・底面流速・潮汐残差流速を用いたロジスティック回帰分析結果を図V-3-14に示す。各プロットのうち、波高と底面流速の組み合わせがウミシヨウブの有無を明確に分離され、またAIC（赤池情報量規準）が相対的に小さかった。このため、以降のウミシヨウブ群落分布の評価には、波高（平均有義波高）と底面流速（平均底面流速）を用いることとした。

3. 月別の波浪条件

再現計算結果を用いて図V-3-4②に示した沖波抽出地点における2015年1月1日～12月31日の期間の平均有義波高時系列変化を図V-3-15に示す。

縦軸に示す日平均有義波高が1m以上の場合を高波浪状態とした。当該海域は、冬季12月～3月が高波浪期であり、夏季5月～9月に台風が来襲するとき以外、静



図V-3-15 沖波抽出地点における日平均有義波高経時変化

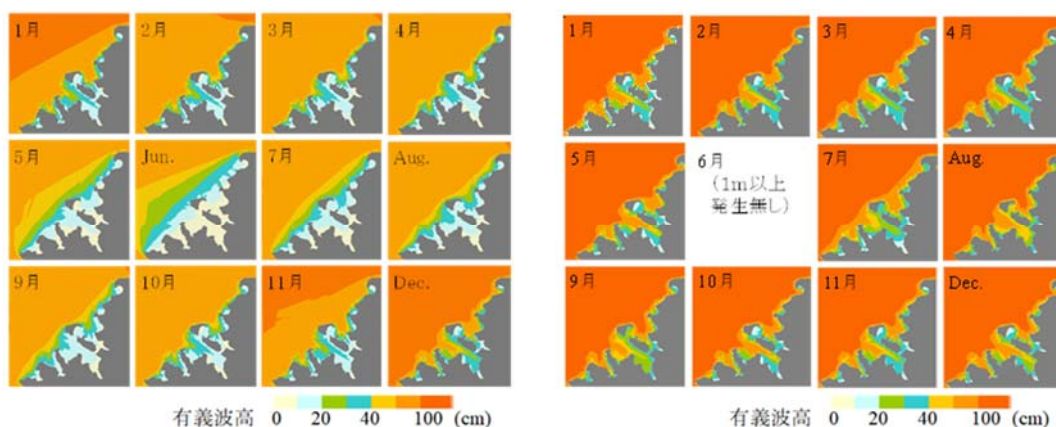
穏である。2015年8月6日～8日に大型台風13号が来襲しており、8月の高波浪のピーク値はこれによるものである。

4. 波高・底面流速分布の再現結果

再現計算では、計算範囲内の1時間毎の波高および底面流速を50m×50mの計算メッシュごとに計算しているが、これらについて各計算メッシュに各月別の平均値を算出した。

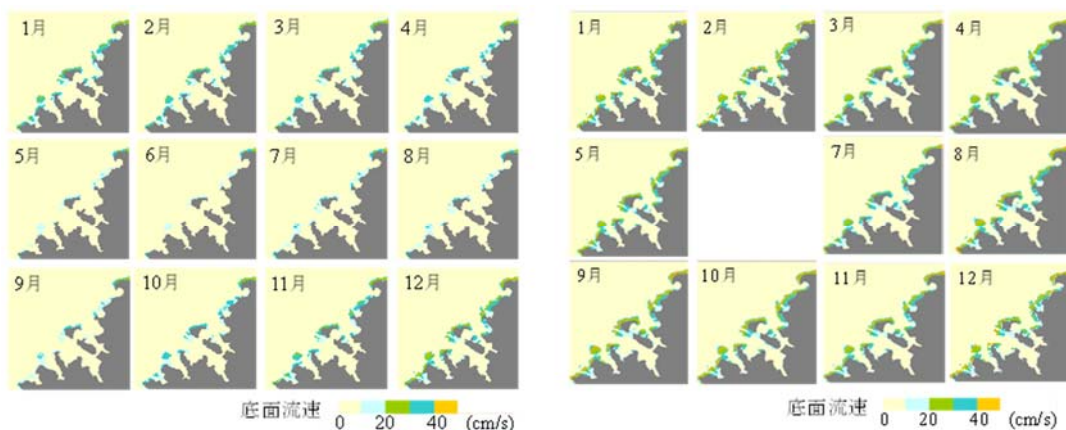
各月の全平均波高、および沖波抽出地点で有義波高1m以上の高波浪時のみの平均波高の値の平面分布を図V-3-16に示す。また、同じ要領で算出した各月別全平均底面流速および高波浪時のみの平均底面流速の平面分布を図V-3-17に示す。なお、6月には、沖波抽出地点で有義波高1.0m以上の状況が認められなかったため、高波浪時の状況を示していない。

これらの計算結果の平面分布より、2013年のウミシヨウブ密生群落分布メッシュの波高および底面流速を抽出した。図V-3-18にウミシヨウブ分布場所の月別平均有義波高を示す。ウミシヨウブ密生群落分布場所の月別平均有義波高は、年間を通じた有義波高の平均値が0.17m、沖波抽出地点で波高が1m以上の高波浪時の年間平均値が0.31mであった。



①月別全平均値 ②月別高波浪時平均値

図V-3-16 月別平均有義波高分布

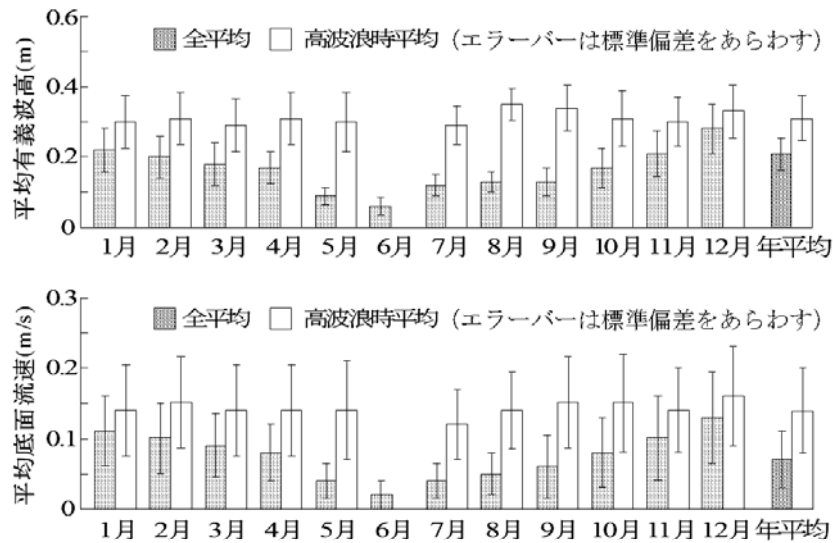


①月別全平均値 ②月別高波浪時平均値

図V-3-17 月別平均底面流速部分布

台風来襲期の8月～9月に月平均有義波高は、0.13mであり、年間平均有義波高より小さいものの、同月の高波浪時の8月に0.35m、9月に0.34mと年平均値の2.6倍以上であった。一方、高波浪が連続する12月には、月平均有義波高が0.28m、高波浪時平均有義波高が0.33mとほぼ同様であり、高波浪の状況が継続していた。2013年に得られた冬季高波浪継続期の平均有義波高 0.28 ± 0.03 mは、冬季高波浪継続期の平均的状況に相当していた。一方、最静穏期の6月に沖波抽出地点で1m以上の波浪は発生せず、月平均波高が0.06mであった。

底面流速平均値も有義波高月別分布の傾向と同様、7月～9月には全体平均値と



図V-3-18 各月別ウミシヨウブ分布場所の平均有義波高・平均底面流速

高波浪時平均値の差が大きく、台風などのイベント時に大きな底面流速が発生することが明らかであり、一方11月～2月には全体の平均値と高波浪時の平均値の差が小さく、高波浪期に大きな底面流速が定常的に作用していることを示している。

5. ウミシヨウブ分布メッシュの再現

各月別の波高と底面流速より、静穏期、イベント発生時、高波浪継続期および年間平均値の平面分布より、ウミシヨウブ密生群落分布の再現および評価を行った。各ケースの波高や流速および選定理由は表V-3-2に示した。また、各ケースについて、有義波高および底面流速の分布よりウミシヨウブ分布メッシュの波高と底面流速がそれぞれ平均値±標準偏差の範囲内にあるメッシュをウミシヨウブの分布再現範囲、即ち分布可能範囲としてこれに該当する部分を平面図上に示した。この結果を図V-3-19に示す。

有義波高と底面流速再現計算の年間平均値によりフィルタリングすることによりウミシヨウブが分布可能としたメッシュ分布範囲内には、1989年および2013

表V-3-2 群落状況評価基準

条件			有義波高(m)		底面流速(m/s)		採用理由
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
静穏期	6月	全平均	0.06	0.03	0.02	0.02	最静穏期, 沖波評価点で波高1m以上無し
高波浪期	8月	全平均	0.13	0.05	0.05	0.06	イベント発生時 大型台風が来襲
		高波浪	0.35	0.07	0.14	0.06	
高波浪期	12月	全平均	0.27	0.07	0.13	0.06	高波浪継続時期 北西風が卓越
		高波浪	0.33	0.08	0.16	0.07	
年間 平均値	全平均		0.17	0.05	0.07	0.04	年間の平均状態
	高波浪		0.31	0.07	0.14	0.06	

年に確認された大部分のウミシヨウブ群落が存在していた。

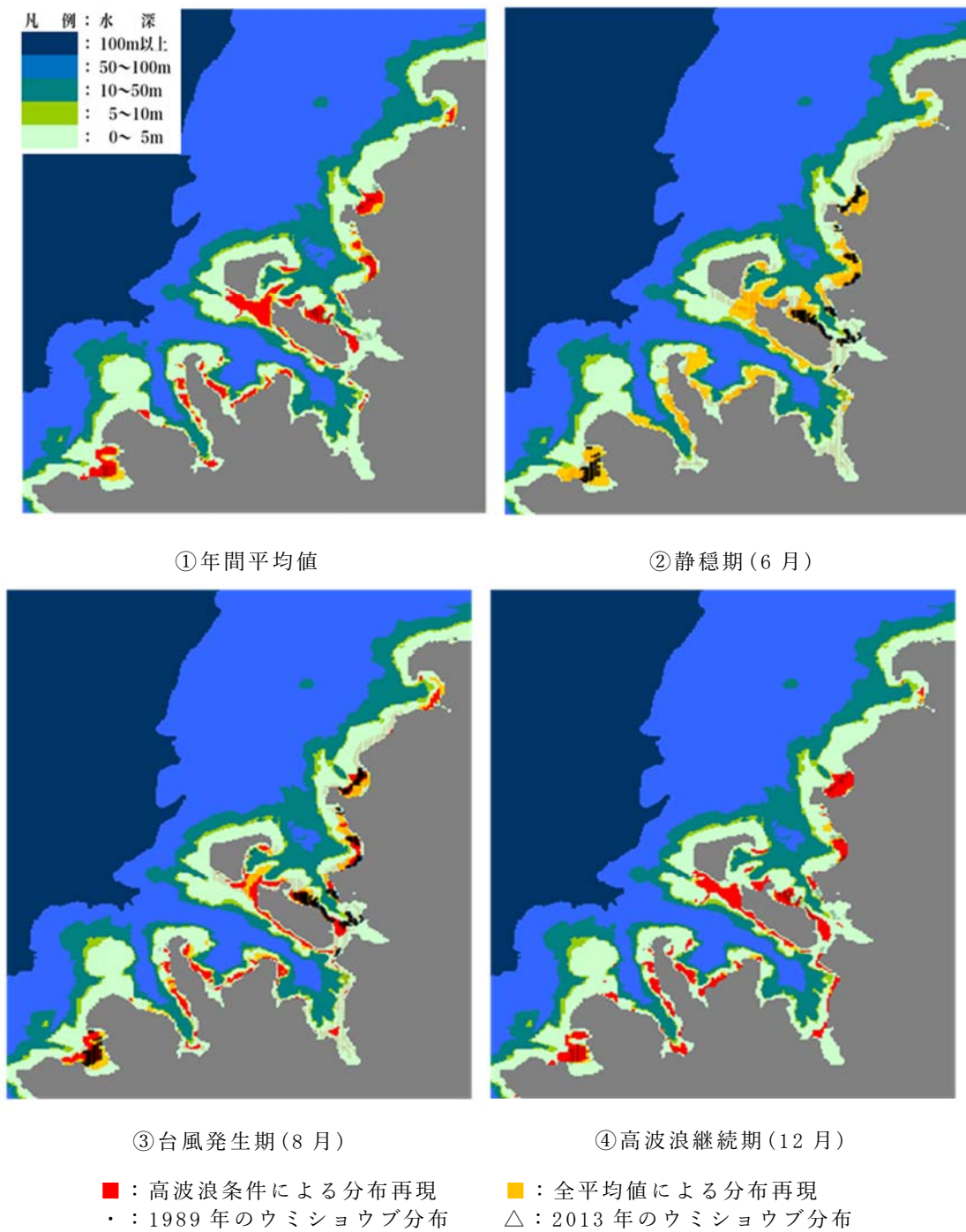
静穏期の6月の条件で再現された分布範囲が最も広い範囲であった。一方、8月の条件で再現された分布範囲は、各検討ケースの中で最も狭かった。8月には台風来襲のイベントがあった。

冬季高波浪期の12月の条件で再現したウミシヨウブ分布再現範囲は、8月の台風発生期の条件で再現された範囲とほぼ同様な範囲であった。なお、8月のイベント発生時の条件の方で波高が高く、底面流速も大きく、ウミシヨウブが分布可能とされた波高と底面流速は12月よりも狭い範囲であった。

これらの季節別の波高と底面流速平面分布より抽出したウミシヨウブ分布再現結果では、台風発生季と冬季の高波浪連続季のそれぞれ高波浪条件を使用したケースの当てはめが良いように見えた。この状況を定量的に評価するため、波高・底面流速分布再現メッシュの中で実際に群落を再現したものと群落が再現できなかったものの割合を検討した。

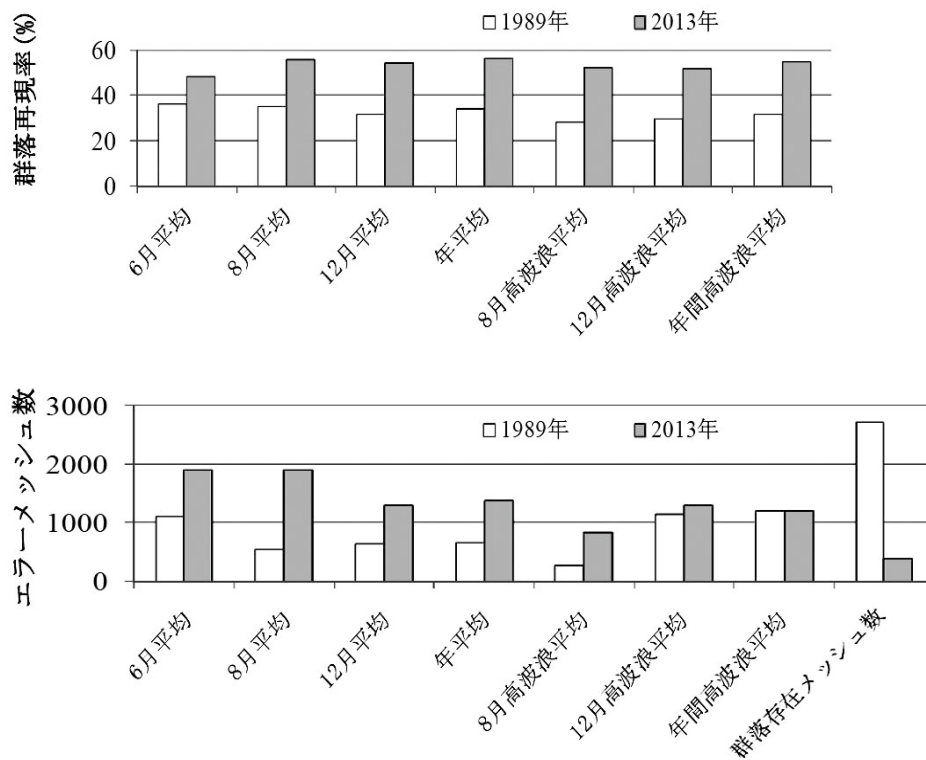
1989年の環境庁の調査および2013年の現地調査で分布が確認されたメッシュのうち、波高・底面流速の再現計算結果より「ウミシヨウブ分布可能」と判断さ

れたものの、ウミシヨウブ群落を確認されなかったメッシュ、即ち「エラーメ



図V-3-19 各条件により再現したウミシヨウブ分布

「メッシュ」の数を図V-3-20に示す。ウミシヨウブ群落を確認されたのは、1989年に2,715メッシュ、2013年に378メッシュであった。また、計算により群落有りと



図V-3-20 群落再現率とエラーメッシュ数

判断したメッシュの割合、即ち再現率は、1989年に約30%、2013年に約50%以上であった。再現率は、平均的条件でも高波浪条件でもほぼ同様であった。

分布可能と判断されたもののウミシヨウブが見られなかった「エラー」としたメッシュ数は、8月の台風によるイベント発生を含む高波浪時に最も少なく、静穏期の6月に最も多かった。

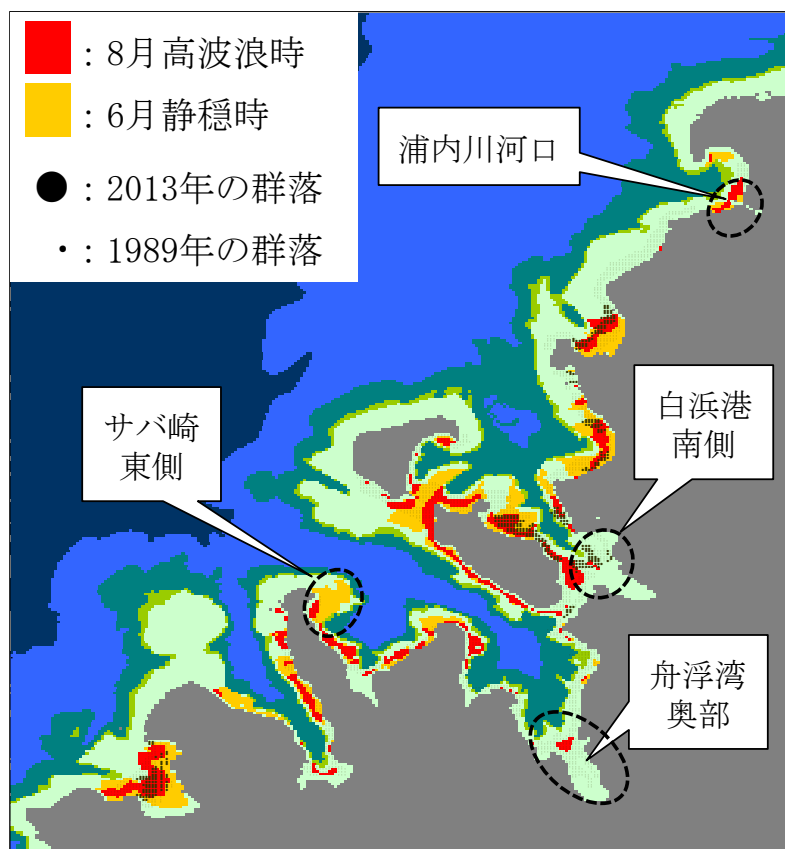
6. 分布再現できなかった要因

再現計算よりウミシヨウブ分布を再現したもののうち、最も広い範囲が再現されるのは6月の平均状況、また最も再現範囲の狭いのは8月の高波浪時のみの平均状況を用いた場合であった。これらの状況によりウミシヨウブ分布範囲を再現した状況の中でウミシヨウブの分布の再現ができなかった部分は、図V-3-21の中に破線で囲んで示した浦内川河口部、白浜港南部、舟浮港奥部、およびサバ崎東側である。

浦内川河口部北部の住吉北地区では、土砂の堆積と水質悪化により10haの群落が消滅したとの環境庁(1997)による記述がある。これにより、河口部では、河川水や河川由来の土砂の堆積や移動がウミシヨウブの分布に影響していることが推察された。

島陰にあり外洋から遮蔽され、波浪の影響が小さい白浜港南側や舟浮湾奥部は、図V-3-8に示したように平均潮汐残差流速が大きな部分であり、水塊が潮汐によって移動している「潮通しのよい」場所であると考えられた。

サバ崎東側のウミシヨウブ分布可能とされた範囲は、海底が岩礁あるいはサンゴ礁の場所であった。ウミシヨウブは底質内に根や地下茎を伸ばすので、このような場所には分布が困難である。



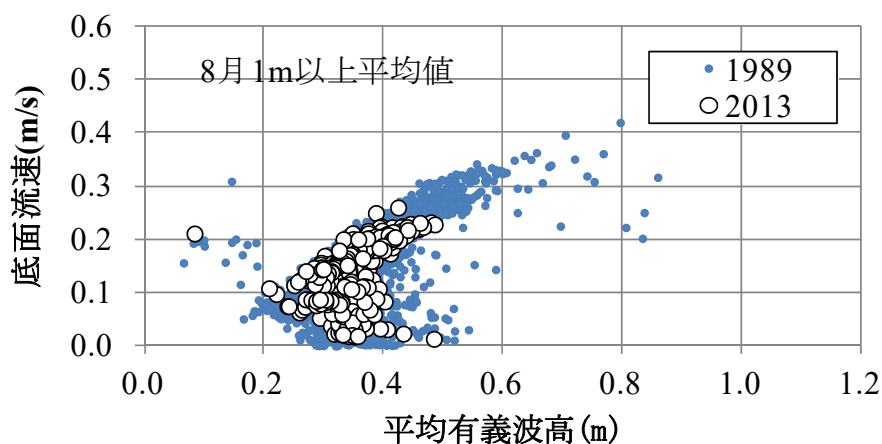
図V-3-21 ウミシヨウブ群落が再現されなかった部分

底面流速が同じでも底質の粒径や比重が変化すれば海底の安定性に影響されて海底の侵食堆積傾向より群落が発達しない可能性もある。本研究では、河川から流入する土砂の堆積についても考慮していない。したがって、底質条件も考慮すれば、より正確に群落分布を再現できるのではないかと推察された。

7. 1989年と2013年の分布の変化

1989年と2013年にウミシヨウブ群落を確認されたメッシュの8月高波浪時の平均値台風来襲期による波高と底面流速の関係を図V-3-22に示す。2013年に分布が消滅したのは、8月の台風発生時の平均有義波高0.5m以上、底面流速0.25m以上の外力が大きい側であった。このことより、群落が消滅したのは、群落の外力的外縁部であると考えられる。

なお、1989年時点の分布範囲のうち、西部の崎山湾から白浜港付近までの範囲では、平山ら(2005)による2004年の調査結果が示されている。その結果におけるウミシヨウブ分布範囲は、1989年の分布範囲と殆ど変化がなかったとされている。また、9年後の2013年には、ウミシヨウブが分布範囲を急激に縮小させていた。この間に特に大規模開発や自然災害は確認されていないが、この要因の1つに竹山ら(2014)により指摘された草食動物による食害が考えられる。



図V-3-22 水深・波高・底面流速別群落分布プロット

したがって、2013年の群落確認範囲は、波浪など物理的な要因に加えて、食害などを受ける状況下でも群落が残存している部分だと言える。この範囲が現時点でのウミシヨウブ分布の最適範囲であると考えられる。

V-3-4 考察およびまとめ

ウミシヨウブの分布場所を西表島北西部の代表的な高波浪条件である冬季の状況、および大潮時の条件を数値計算によりその分布条件を再現し、この条件を用いてウミシヨウブの密生群落分布範囲と同一メッシュ上で直接対比させた。ウミシヨウブが密生していた物理条件を用いて物理条件の再現計算の場をフィルタリングしたところ、現状の分布がほぼ再現できた。このことから、ウミシヨウブ分布を規定する条件のうち、水深・波・流れの影響が大きいものと考えられた。

勿論、底質条件や濁りや透明度、および細粒分の堆積などの要因もウミシヨウブ分布に大きく影響している。造礁サンゴ群集との競合や食害生物による影響も考えられる場合もある。また、過去の分布が現在消滅したことが確認されている網取湾奥部では、物理条件からウミシヨウブが分布可能とされた。

中島ら(2013)や村上ら(2015)に述べられているように、ウミシヨウブの伝播力は極めて乏しい。このことから考えると、過去の何らかのイベントによりウミシヨウブ群落が消滅し、その後種苗が供給されないことにより群落が回復していないことも考えられる。

この検討で評価対象としたものは、沿岸浅海域のウミシヨウブ分布に影響が大きいと考えられる波高と波浪に由来する底面流速だけであった。しかし、ウミシヨウブの分布を左右する波浪や底面流速は、台風や冬季季節風のような大きな外力が発生する気象イベントであることが明らかになった。この海域におけるイベント発生時の波高と底面流速分布という2つの要素だけでも分布範囲の50%程度

が計算メッシュ上で再現可能であり、ウミシヨウブ分布の外側の境界を明らかにすることが可能となった。

波浪や底面流速などの物理的条件によって示されるウミシヨウブの分布可能範囲は、分布のポテンシャルを示すに過ぎず、分布の外縁を示している。この範囲の中で、流入河川からの土砂などの影響や競合生物や食害生物の活動や分布といったフィルターを重ねることにより、現状の分布状況を正確に再現できるようになる。数値計算による物理量より規定されるウミシヨウブ分布外縁は、今まで研究してきた各種の海草と同様に、あくまで分布が可能な範囲の外縁を示すだけであるが、この範囲内でなければウミシヨウブの保全や再生も出来ない。即ち、本種の保全や再生を目指す場合の場所を選定する上で必要不可欠な情報を得ることが出来たと考えている。

第VI章 総括

1. 播種および播種マット設置実験

アマモの移植実験については、第II章で述べたように良好な成果が得られなかった。アマモの種子採取、保存、育生には多大な労力がかかるが、発芽率は播種した種子の10%に満たなかった。また、移植した株も殆どが消失した。

移植実験の成果は、移植苗床のうち表面に砂が堆積したケースのみ生残したことであり、アマモ分布と底質の侵食堆積をはじめとする地形安定性評価を行うきっかけとなった。

2. アマモ場成立条件

当時すでに丸山ら(1987)によりシールズ数とアマモ分布の関係性が述べられていた。本研究では、当時実用化されたばかりの三次元地形変化モデルを用い、同時に計算対象地点のアマモ場現地調査を行った。両者を同一のメッシュで比較した結果、対象海域で通常発生し得る高波浪状態（有義波高 1m 以上）が作用した場合、シールズ数 $\phi < \text{約 } 0.5$ の底質移動がシートフロー状態にならない範囲、かつ堆積領域にアマモが分布していることが明らかになった。

この条件は、複数のアマモ場でも共通したものであり、普遍性を持つことが明らかになった。

3. 実際のアマモ場造成への適用

広島県三原港においてアマモ群落の移植を実施した。現地での波浪観測により、現地に通常作用する高波浪条件は、船舶航跡波であることが明らかになった。この条件で底質安定性を評価すると、アマモが分布している場所は、殆どシートフロー状態にならない場所であることが明らかになった。

船舶航跡波を用い移植先を評価した結果、シートフロー状態にならず、アマモ

が分布可能であることが明らかになった。移植後、アマモは生残した。さらに、本四架橋開通により船舶航跡波の影響が軽減したこともあり、移植群落は拡大した。このことにより、波浪による底質安定性に基づいてアマモ移植場所を評価することは、妥当であることが明らかになった。

4. 他種の海草への適用

(1) コアマモ

東京湾奥の運河地域における人工干潟で潮間帯でも生育可能なコアマモの移植実験を行った。潮位が支配的な条件下で船舶航跡波作用時にコアマモが生残した場所のシールズ数を算出したところ、 $\phi < 0.3$ であった。この範囲は、底質移動が掃流～浮遊状態であった。

(2) ウミショウブ

西表島沿岸における既存調査結果によるウミショウブ分布と冬季高波浪条件および1年間の月別波浪条件を用いた波高・底面流速を比較した。対象地区では、底質がサンゴ礫を含むためシールズ数を算出せず、有義波高と底面流速により評価を行った。その結果としては、台風発生季および冬季高波浪季による波高・底面流速より再現した範囲が現状のウミショウブおよび過去に分布していた範囲を良く再現した。

5. 海草群落保全修復と物理条件

海草群落の保全については、殆どの場合、海草を移植する修復が主体となっている。現状での保全活動は、大部分が保護水面を設けることになると考えられる。しかし、海草群落は多くの場合共同漁業権の範囲内にあるので、漁業者との調整が必要と考えられる。保全場所の個所付けに波浪などの状況を考慮することが考えられるが、現状でそのような条件により保全区域を設定したという事例はまだないと思われる。なお、移植により海草群落を維持しようとするとき、海草の集

団遺伝学的配慮を行う必要がある（加藤・颯田 2004, マリノフォーラム 21 2007）。

アマモをはじめとする海草群落の修復については、播種や移植による群落再生が数多く行われている。これらについては、既に各県や水産庁によりマニュアル化されている。

多くのマニュアルでは水質や底質についての記述が豊富であるが、川崎ら(1988)は既に底質によらずアマモが生育可能であることが述べられている。また、現実には海草群落の修復を行うことを考えた場合、移植範囲の水質を変化させることは現実的でない。河口近くで水質や流入する濁り成分の変化が激しい場合や常に排水流入の影響下にある場所などは、海草群落の修復対象の場所として適していない。

時岡ら(1972)が指摘しているように、沿岸域で環境や生物相を左右する最も重要な条件であるとも言える波浪条件やこれによって引き起こされる底質の安定性についての記述は少ない。特に、波浪と海草の生育基盤である海底の安定状況についての情報が記述されるのは、海の自然再生ワーキンググループ(2003)やマリノフォーラム 21(2007)以降である。

実際に海草群落を修復する場合、移植場所の整備を目的として波浪などの物理条件を制御したという事例は実際に多くない。これには、大規模の土木工事が必要となり、海草を移植や播種するよりコストがかかるためと考えられる。

海浜防護のための消波潜堤を設置したために、アマモ分布範囲が大幅に増大した事例がある（島谷ら 2001, 2002）。この事例では、高波浪に対する海水浴場の砂浜維持が目的であったため、アマモ分布範囲の拡大を考慮されていなかった。この海岸で消波潜堤が設置され、アマモ群落が拡大した後、現地で秋季の高波浪条件を実測した結果を用いて消波潜堤設置前後のシールズ数分布を計算し、同じ

く消波潜堤設置前後のアマモ分布域を比較した。そして、消波潜堤設置後は高波浪時にシートフロー状態にならない範囲が拡大し、この範囲がアマモ分布の拡大範囲に整合していた。

海草群落を修復するために海草の株と共に底質を配置する場合もある。この場合、底質を配置した分だけ水深が浅くなることで波浪の影響を受け易くなる。本論文で述べた広島県三原市地先の移植事業では、アマモを底質ごと移植するものであり、海底が移植底質分だけ嵩上げされ水深が浅くなった。これにより、底質表面が波浪により受ける力が増加するので、数値計算では水深が浅くなった分を考慮してシールズ数を算出している。同様の手法は、沖縄地区のリウキュウアマモなどの群落移設でも行われており、現在、通常の検討手法となっている。沖縄件中城湾におけるリウキュウアマモなどの熱帯性海草移植では、移植場所を予め評価してから海草の移植が行われた。この事例では、現地で観測された既往最大クラスの台風時の波浪条件を用い、底質改善および水深調整のために実施された盛砂の移動限界水深を算出し、移植場所を決定している（照屋ら 2011）。波浪が制御される前提でアマモ場を造成した事例については次のようなものがある。熊本県樋合島の海水浴場保全を目的とした砂留堤造成に伴うアマモ場修復の事例が橋本(1993)により報告されている。この事例では、砂留堤建設に伴い消失するアマモ場について砂留堤により波浪が遮蔽される場所をアマモが生育可能な水深まで嵩上げた後にアマモの移植が行われた。また、広島県呉市下蒲刈島では、防波堤延伸に伴いその背後が静穏になることを見越してアマモを移植した事例がある（杉本ら 2019）。この事例では、覆砂や水深調整が行なわなかったが、防波堤延伸後の波高分布を予め算出し、波高が低減され、底質移動状況が緩和される範囲を移植対象地とした（平岡ら 2006）。

浚渫土や建設発生土の処分場所として造成した人工干潟が海草群落になった事

例もある。浚渫土を投入した後に表層に砂を散布して人工干潟を造成する事例が一般的である。これらの事例では、波浪などにより表層に散布した砂が流出しないことが確認されている。これらのうち、広島県似島地区の人工干潟では、造成後に水深がアマモの生育に適當になったため、ここにアマモを移植したものである。この事例では、1993年度に移植した株数が2001年度に1.5倍になっていた（Morita *et al.* 2002, 寺脇ら 2005）。

浚渫土の処分場所として造成された山口県徳山下松港の大島干潟では、人工干潟造成後、自然にアマモ、コアマモ、ウミヒルモが加入した。ここで5年間の月別最大波高を平均した波浪条件を用いて算出したシールズ数が0.2以下の場所が拡大して海草群落形成されていた（斎藤ら 2017）。

本研究の成果により、土木事業で用いられる波浪や底質安定性の数値計算結果を用いて海草群落分布条件を評価し、移植計画を立てることが一般的となった。沿岸の土木工事では、底質改善のために砂を投入する覆砂工事が普通に行われる工程である。覆砂を行う範囲の設定などのために施工範囲周辺の波浪および底質安定性を予測することは通常行われている。現在では、波高分布計算や波浪観測も従来によりも容易になってきている。海草群落の修復や保全の個所付けのために物理条件の定量的予測は、事業を行う上で、もはや必須である。

6. 海草群落の分布と物理的条件の関係

海草群落は沿岸の浅い砂泥や礫底の海底に分布している。このような場所は波浪や潮流の影響を受ける。

海草群落が分布するためには、水質・光条件の他、海草の地下茎が発達する海底部分の状態が適切である必要がある。沿岸の浅海域では、波浪が影響することは前述の時岡ら(1972)が指摘しているように沿岸の生物群集が生息生育する基質の最大の決定要因が波浪である。しかし、従来の記載は定性的な「露出度」や

「内湾度」というものであった。本研究は、これらの波浪の影響を土木分野で一般的になっている数値計算を用いて評価し、海草群落の分布条件を定量化したことが最大の成果である。

海草群落成立の環境要因には、光量、外力（波・流れ）、底質、水温、塩分、栄養塩濃度などがある。移植などによる修復を行う場合、海域の水質・塩分や水温を変更することは非常に困難である。人為的に環境を改善する余地があることは、底質改善（覆砂）、水深変更（嵩上げ）および波浪制御である。なお、底質の粒度などが変化すれば、同じ波浪が作用しても、その安定性は異なる。また、水深が浅くなれば、波浪の影響を大きく受けることになる。このように、海草群落は、波浪や流れなどの物理的現象の影響を強く受けるため、適切な外力評価が必要である。

本研究では、数値計算により評価した底質安定性を表すパラメータであるシーolz数の平面分布計算と海草群落の分布を直接比較検討した。この検討に際しては、シーolz数の意味を良く理解しておく必要がある。

海草群落の分布を波浪など物理的條件より評価する場合には、高波浪時の条件でシーolz数を算定するケースが多い。この時の波浪条件がそれぞれの研究やマニュアルにより異なっていることに注意を要する。即ち、シーolz数の評価方法や沖波の設定方法、評価地点がそれぞれ異なり統一されていない。

島谷・中瀬(2004)によるシーolz数の計算方法の比較において、本研究で用いたシーolz数の算出結果は、丸山ら(1987)の計算方法を採用したものの約2倍の数値を示すと報告している。川崎(2003a, b)も同様の解釈をしており、シーolz数を評価する場合には、計算方法を評価してその数値を補正する必要があると述べられている。したがって、今後、アマモ場など海草群落分布に関する外力評価を行う際には、使用する波浪条件が平均値か最大値かを明示し、適切な外力評

価を行う必要がある。

外力評価に用いる沖波条件として高波浪時のデータを用いる必要があるが、具体的にどのような統計的諸元を用いた沖波条件にするのかについては現在のところ統一されていない。既存研究事例でも最大有義波や1年確率波、月数回来襲する波浪など様々な統計的諸元が用いられている。もし沖波条件の設定が異なった場合、他の条件が同一であっても外力評価の結果（シールズ数の算定結果）が異なる。したがって、外力評価の際には沖波としてどのような条件を用いたかを明記する必要がある。

本研究では、「通常発生する高波浪条件」という定性的な表現を用いている。これは、対象とする海草群落がどのような場所に分布して、どのような波浪などの影響を受けるかがそれぞれの場所により異なるので、一律に決定できないと考えためである。各海域の条件を考慮して設定した波浪条件を用いて海草群落の有無を評価する必要がある。

しばしば海草群落の分布する場所のシールズ数が波浪条件を記載しない状態で述べられている場合がある。例えば、アマモ分布域のシールズ数 $\phi \leq 0.2$ であるなどの記載（森田 2004）がある。海域が静穏な場合には、当然底面流速やシールズ数が小さくなる。シールズ数を算出する場合に重要なことは、どのような海象条件を対象とするかであり、シールズ数を表記する場合、その波浪条件を記載しなければ誤解を生じる恐れがある。また、瀬戸内海のような潮流が卓越する海域や海浜流の影響が大きい海域など流れの影響が無視できない場合には、波だけでなく流れの影響も十分に考慮する必要がある。

さらに、潮位条件も考慮しなくてはならない。海草類は水深数 m 程度の浅海域に生育するため、波浪場からシールズ数を算定する場合、潮位が影響する。特に、潮位差の大きい海域においては、どの潮位で設定するのかによって算定され

るシールズ数が大きく異なる。また、コアマモのように潮間帯に分布する海草の場合、干出時には波浪の影響を受け難い。しかし、波浪場からシールズ数を算定している評価例において、潮位条件の設定を詳細に記述している例は殆どないのが現状である。

波浪場よりシールズ数の算定を行う際には、沖波条件の設定と同様どのような潮位条件を用いたかの明記が必要である。

外力評価の結果は、前述したように波浪条件やシールズ数の算定方法や各種パラメータ（沖波、潮位など）の設定方法、流れの影響の有無によって大きく異なる可能性が高い。

底質の比重や粒径によっても結果は変化してくる。よって、海草群落の分布条件の評価を行う場合には、数値のみで比較検討を行うことを避け、外力の計算条件や計算方法についても明記しなくてはならない。

なお、本研究で提唱した海草分布条件は、その海域に通常発生し得る高波浪条件が作用した場合に底質移動状況がシートフローにならない条件（シールズ数 $\phi < 0.5$ 程度）としているが、これは海草が分布できない範囲を表すものであり、最適条件を表すものでない。また、アマモの場合、分布している場所は、大部分が堆積傾向の場所である。短期間、シートフロー状態になっても、堆積傾向の場所であれば、流失しにくいと推察できる。

7. 海草流失のメカニズム

波浪や流れの外力に対する海草の流失耐性として、Koch *et al.* (2000, 2006) および中西ら(2018)のように底面流速や波動流速振幅が海草の「葉」に作用して株を引き抜くことに注目した研究がある。これに対して本研究では、波浪などの外力が底質に作用して、底質が不安定になることで海草が脱落するという仮説である。このために、底質移動状況を評価できるシールズ数や底面流速をパラメ

ータとして海草群落の分布を評価した。

海草群落の存在についてシールズ数の数値により評価している事例は多いが、数値の意味まで考慮している事例は少ない。マリノフォーラム 21(2007)のマニュアルに言及されているようにそのメカニズムについての記載はなされていない。

本研究では、シートフロー状態（シールズ数 $\phi \approx 0.5 \sim 0.6$ ）になると底質が全体的に移動するので、根による固着力が低下すると述べた。

土田ら(2006)は、アマモが台風時などに根ごと流失する原因として波浪による水圧変動により地盤が液状化するためと述べている。アマモ場を想定した模型地盤を作成し、細粒分を含んだ地盤の水圧変動下での底質の液状化に対する安定性と水圧変動下でのアマモの引き抜き抵抗を調べた結果、台風時の波浪を再現した一次元水圧変動下において表層地盤の液状化が起こること、同時にアマモ模型の引き抜き抵抗が減少することを示した。

このことは、底質の移動状況がシートフロー状態になると、アマモ分布が見られなくなることを裏付けている。シートフロー状態の時、底質は液状化したような状況で表層の全体が移動するからである。

本研究成果で抽出したシールズ数や波浪条件の考え方は、そのまま現在の海草群落の保全や再生に用いられているわけではない。しかし、本研究の成果である底質安定性を評価するパラメータであるシールズ数や底面流速などの平面分布を用いて海草分布範囲と比較することについて 1992 年に研究成果を発表した後、多くの海岸工学の技術者や研究者が同様の研究を行うようになった。そして現在では、海草分布範囲が通常受け得る最大クラスの波浪条件が作用する場合、底質移動状況がシートフローにならない範囲が海草の分布可能範囲であることが各省庁発行の海草群落造成に係るマニュアルにも採用されるなど、一般的な方法とな

っている。今後とも海草群落の保全や修復に際して、波浪や底質安定性などの物理的条件を設計や計画を行う上で活用することが望まれる。

謝辞

本研究は 1986 年に着手いたしました。その間、非常に多くの皆様のご指導、御協力、ご助言を賜ることで、漸くとりまとめることができました。

本研究のとりまとめに当たり、本学位論文の主査である日本大学大学院生物資源科学研究科 荒 功一教授、および廣海十朗特任教授からは、ともすれば論文執筆に挫けそうになったときに叱咤激励をいただき、何とかとりまとめることができました。また、副査として専攻主任の野口 章教授、ならびに長坂貞朗教授、大沢啓志教授からは、有益なご意見を頂きました。ここに深く御礼いたします。

研究の初期段階には、電力中央研究所（当時）の寺脇俊信氏、川崎保夫氏、五洋建設（株）土木設計部（当時）の清水琢三氏、金山 進氏、野谷 斎氏には様々なご指導、ご助言を頂くとともに、有益な議論をさせていただきました。また、ともに数値計算や現地調査および現場対応を行う中で、様々な議論を行った五洋建設（株）の同僚、関本恒浩氏、今村 均氏、檜山博昭氏、田中裕一氏、島谷 学氏、鵜飼亮行氏、山本省吾氏、百瀬泰彦、浜谷信介氏、竹山佳奈氏の皆様をはじめとする五洋建設（株）各支店・現場のたくさんの皆様に御礼申し上げます。

アマモ場の現地調査をご快諾頂いた千葉県富津市天羽漁業協同組合の皆様、現地調査を実施して頂いた（株）日本海洋生物研究所の皆様、アマモの移植実験にご協力頂いた湊潜水工業の皆様の御協力に御礼申し上げます。

コアマモの人工干潟への移植をご快諾いただいた大田区地域基盤整備第一課の皆様、調査時に船舶をご提供頂いた東京湾遊漁船業協同組合の皆様、およびコアマモの苗のご提供を頂いた港湾空港技術研究所の桑江朝比呂氏、渡辺謙太氏に御礼申し上げます。

ウミシヨウブの調査に当たり、船舶運航や現地調査指導を頂いた東海大学沖縄地域研究センター（当時）の河野裕美様、水谷 晃様、崎原 健様に御礼申し上げます。また、同センターの研究でウミシヨウブ分布調査を行った学生の蔵持登士江様、岩崎彩加様、玉本満氏の皆様の貴重なデータを活用させて頂きました。共同研究者として物理条件の再現計算を実施して頂き、かつ有意義な論議を重ねて頂きました防災科学技術研究所の下川信也氏、村上智一氏に御礼申し上げます。

この長い研究期間には、実際の海草移植に携わることも何度かあり、このような研究をさせて頂いた会社に対しても、多少は貢献できたのでは無いかと自負しております。

かつては失敗の連続であった海草群落の修復や保全も最近では成功する事例も増えております。本研究の成果が海草群落復元に多少でも役立つことを願っております。

引用文献

- 相生啓子 (1996) 藻場生態系－アマモ場を中心に－. 遺伝, 50(7), 24–29.
- 新崎盛敏, 堀越増興, 菊池泰二 (1976) 第I編 海藻. 海洋科学基礎講座 5 海藻・ベントス, 3–147, 東海大学出版会, 東京.
- 新崎盛敏 (1950–1) アマモ・コアマモの生態(I). 日本水産学会誌, 15(10), 567–562.
- 新崎盛敏 (1950–2) アマモ・コアマモの生態(II). 日本水産学会誌, 16(2), 70–76.
- Booji, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H. (1999) A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104(C4), 7649–7666.
- 布施慎一郎 (1962) アマモ場における動物群集. 生理生態, 11, 1–22.
- 合田良実 (1975) 浅海域における波浪の碎波変形. 港湾技術研究所報告, 14(3), 59–106.
- 橋本 牧 (1993) ミティゲーションに配慮した事例－漁港海岸事業実施にともなうアマモの移植－. 沿岸域, 6, 83–84.
- 幡手格一 (1981) 藻場・海中林. 水産学シリーズ 38, 93–115, 恒星社厚生閣, 東京.
- 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(12), 849–854.
- 平岡喜代典, 杉本憲司, 三浦仁志, 寺脇利信, 岡田光正 (2006) アマモ場再生事例と実証試験に基づくアマモ場再生の検討. 環境科学会誌, 19(3), 241–248.
- 平山琢二, 小倉 剛, 須藤健二, 上原一郎, 比嘉辰雄, 向井 宏, 大泰司紀之 (2005) 沖縄県西表島の西岸における海草の種類と分布. 琉球大学農学部学術報告, 52,

1-3.

石川雄介, 川崎保夫, 本多正樹, 丸山康樹 (1988) 電源立地点の藻場造成技術の開発. 第9報 水中の光条件に基づくアマモ場造成限界深度の推定手法, 電力中央研究所報告, U88010, 20 p.

磯部雅彦 (1986) 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・波浪変形の計算法. 第33回海岸工学講演会論文集, 134-138.

上出貴士, 高橋芳明, 山内 信, 井関和夫 (2013) 和歌山県田辺湾の潮間帯におけるコアマモ群落の底質環境とベントス群集組成. 水産増殖, 61(1), 61-72.

金澤 剛, 森 鐘一 (2003) 現地アマモ場造成試験と敵地評価に関する研究. 海岸工学論文集, 50, 1226-1270.

環境庁 (1980) 海岸調査・干潟・藻場・サンゴ礁分布調査・海域環境調査 (全国版). 第2回自然環境保全基礎調査海域調査報告書, 255-306, 東京.

環境庁 (1994) 第2巻 藻場. 第4回自然環境保全基礎調査, 海域生物環境調査報告書 (干潟, 藻場, サンゴ礁調査) (オンライン),

<http://www.biodic.go.jp/reports/4-12/r00a.html>

環境庁 (1997) 第2章 藻場. 日本の干潟・藻場・サンゴ礁の現況, 349-359, 東京.

環境省 (2004) 藻場の復元に関する配慮事項. 1-16, 東京.

Karlsson, T. (1969) Refraction of continuous ocean wave spectra. Proc. ASCE, 95, WW4, 1, 437-448.

加藤由実子, 颯田葉子 (2004) phyA 遺伝子の塩基配列に基づくアマモの集団遺伝学的解析. 海洋と生物, 26(4), 322-329.

川端豊喜 (1996) 水生植物による内湾域における環境修復. 水産学シリーズ 110, 79-93, 恒星社厚生閣, 東京.

川崎保夫 (2003a) 海草群落 (アマモ場) の機能と修復・創世. 海洋と生物, 25(2),

85-91.

川崎保夫 (2003b) 砂地海底での藻場の復元・創出技術. 日本海水学会誌, 57(6), 455-461.

川崎保夫, 飯塚貞二, 後藤 弘, 寺脇利信, 渡辺康憲, 菊池弘太郎 (1988) アマモ場造成法に関する研究. 電力中央研究所総合報告, U14, 231 p.

川崎保夫, 石川雄介, 丸山康樹 (1991) アマモ場造成適地選定法. 沿岸海洋研究ノート, 27, 136-145.

岸本健一, 有田 守 (2018) ローカルリモートセンシングにおける CNN によるアマモ場判別の有用性に関する研究. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 74(2), I_432-I_437.

Koch, E. W. and Huettel M. (2000) The Impact of single seagrass shoots on solute fluxes between the water column and permeable sediments. *Biol. Mar. Medit.*, 7(2), 235-239.

Koch, E. W., Ackerman, J. D., Verduin, J. and van Keulen, M. (2006) Fluid dynamics in seagrass ecology - from molecules to ecosystems. In: Larkum, A.W.D., Orth, R. J. and Duarte, C. M. (eds.), *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*, 193-226, Springer, Dordrecht, The Netherlands.

小舟浩治, 亀山 豊, 菅原一晃, 橋本典明 (1990) 沿岸波浪観測年報 (1988). 港湾技研資料, 666, 3-11.

国分秀樹, 森田晃央, 宮松亜美, 前川行幸 (2010) コアマモの地下茎分枝に及ぼす地盤高と底質の影響. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 66(1), 1206-1210.

国土交通省中国地方整備局港湾空港部 (2016) 瀬戸内海総合水質調査ホームページ (オンライン),

<https://www.pa.cgr.mlit.go.jp/chiki/suishitu/index.html>.

- Komatsu, T., Umezawa, Y., Nakaoka, M., Supanwanid, C. and Kanamoto, Z. (2004) Water flow and sediment in *Enhalus acoroides* and other seagrass beds in the Andaman Sea, off Khao Bae Na, Thailand. *Coral Marine Science*, 29(1), 63–68.
- 越川義功, 中村華子, 田中昌宏, 小河久朗 (2007) コアマモ場再生を目指した草体増殖および種子発芽特性の検討. *海岸工学論文集*, 54, 1076–1080.
- 越川義功, 中村華子, 田中昌宏 (2009) 後背地の影響を受けやすい干潟におけるコアマモ群落の消長・維持機構. *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 65(1), 1076–1080.
- 熊本県水産研究センター (2014) 漁業者のためのアマモ造成マニュアル. 熊本, 27 p.
- 桑江朝比呂, 細川恭史, 古川恵太, 三好英一, 木部英治, 江口菜穂子 (1997) 干潟実験施設における底生生物群集の動態. *港湾技術研究所報告*, 36(3), 3–28.
- 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 (オンライン), <https://www.mf21.or.jp/pdf/amamo/guideline.pdf>.
- 丸山康樹, 五十嵐由雄, 石川雄介 (1987) アマモ場適地選定手法. 第 34 回海岸工学講演会論文集, 227–231.
- 丸山康樹, 五十嵐由雄, 石川雄介, 川崎保夫 (1988) 電源立地点の藻場造成技術の開発. 第 8 報 – アマモ場造成適地の砂地盤安定度の推定方法 –. *電力中央研究所報告*, U87069, 5–9.
- 三重県水産研究所 (2011) アマモ場再生ハンドブック. 三重, 34 p.
- 水谷 晃, 井上太之, 玉本 満, 北原侑治, 藤吉正明, 村上智一, 中瀬浩太, 河野裕美 (2019) 西表島周辺における熱帯性海草ウミシヨウブ *Enhalus acoroides* (L.f.) Royle の有性繁殖: 分布北限域の開花時期, 結果率および果実の生残.

- 保全生態学研究, 24(2), 179–189.
- 森田健二 (1989) 広島県におけるアマモ場造成について. 海洋調査協会調査研究委員会第6回技術発表会予稿集, 28–30.
- 森田健二 (2004) アマモ場造成の実践からみた生物多様性の保全とアマモ場成立条件の検証. 海洋と生物, 26(4), 330–335.
- Morita, K., Hamabata, M., Masuhara, H., Furuse, K. and Kasasaki, Y. (2002) *Zostera* (eelgrass) bed restoration in Japan. Fisheries Science, 68(2), 1771–1774.
- 森田健二, 竹下 彰 (2003) アマモ場分布限界水深の予備評価手法. 土木学会論文集, 741(VII-28), 39–48.
- 村上智一, 河野裕美, 玉本 満, 水谷 晃, 下川信也 (2015) 数値シミュレーションを用いた西表島北西部のウミシヨウブ群落における種子の分散力評価. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 71, 951–956.
- 村上智一, 安田孝志, 大澤輝夫 (2004) 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 σ 座標モデルの開発. 海岸工学学論文集, 51, 366–370.
- 長濱祐美, 野村宗弘, 中野和典, 木村賢史, 西村 修 (2007) コアマモ群落の環境特性と底生生物に及ぼす影響. 土木学会論文集 G, 63(4), 233–240.
- 中島祐一, 松木悠, Dan Arriescgado, 練 春蘭, Miguel Fortes, Wilfredo Uy, Wilfredo Campos, 仲岡雅裕, 灘岡和夫 (2013) 遺伝マーカーを用いた熱帯性海草ウミシヨウブの地域個体群維持機構の解明. 日本生態学会 60 回全国大会講演要旨.
- 中村義治, 三村信男, 秋元義正 (1990) 波による二枚貝の輸送モデルと漁場形成機構. 海岸工学論文集, 37, 818–822.
- 中村洋平 (2010) ウミシヨウブ藻場の消失に伴う魚類群集構造の変化. 西表島研

究 2009, 18–22.

中西 哲, 大場達之, 武田義明, 服部 保 (1983) 日本の植生図鑑 <I> 森林. 168–186, 保育社, 東京.

中西佑太郎, 中山恵介, 中川康之, 茂木博匡, 田多一史, Mathew Hipsey, 桑江朝比呂 (2018) 波・流れ場とアマモ場の相互干渉解析. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 74(2), I_31–I_36.

Nakase, K. (2000) Quantitative estimation of eelgrass distribution from the viewpoint of external forces in Takeoka Beach, Tokyo Bay, Japan. *Biol. Mar. Medit.*, 7(2), 397–400.

中瀬浩太, 村上智一, 鶴飼亮行, 水谷 晃, 下川信也, 河野裕美 (2015) 外力再現計算を用いた西表島北西部海域におけるウミシヨウブ群落分布域の物理条件解析. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), I_957–I_962.

中瀬浩太, 村上智一, 河野裕美, 鶴飼亮行, 水谷 晃, 下川信也 (2016) 月別外力再現計算を用いた西表島北西部海域のウミシヨウブ分布条件の評価. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 72(2), I_1429–I_1434.

中瀬浩太, 桑江朝比呂, 渡辺謙太, 荒 功一, 浜谷信介, 田中裕一 (2020) 京浜運河におけるコアアマモ群落造成について. 土木学会論文 B3(海洋開発), 76(2), I_822–I_827.

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.

中瀬浩太, 田中裕一 (1993) 海浜変形予測手法によるアマモ場成立条件の現地への適用. 海岸工学論文集, 40, 1061–1065.

中瀬浩太, 島谷 学, 関本恒浩 (1999) 船舶航跡波影響下のアマモ分布条件. 海岸工学論文集, 46, 1196–1200.

- 中瀬浩太, 百瀬泰彦 (2002) アマモの移植技術. 電力土木, 298, 66-69.
- 奥村宏征, 浅海 茂, 森松秀治, 前川行幸, 上野成三 (2006) マルチビームソナーを用いたアマモ群落現存量推定法の開発. 海岸工学論文集, 53, 1436-1440.
- 大場達之, 宮田昌彦著 (2007) 日本海草図譜. 北海道出版会, 札幌, 128 p.
- Rollón, R. N. (1998) Spatial Variation and Seasonality in Growth and Reproduction of *Enhalus acoroides* (L.f.) Royle Populations in the Coastal Waters off Cape Bolinao, NW Philippines. 9-35, CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands.
- 齋藤輝彦, 川島剛央, 貞島一雄, 首藤 啓, 菅家英朗, 中林孝之 (2017) 人工干潟造成による環境創造の実証的研究ー山口県周南市大島干潟を検証してー. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 73(2), I_1273-I_1278.
- 齋藤 幸, 野村宗弘, 西村 修 (2015) 干潟土壌材に用いる成功スラグの粒径がコアマモの生育に及ぼす影響. 土木学会論文集 G(環境), 71, III_215-III_220.
- Shibayama, T. and Horikawa, K. (1982) Sediment transport and beach deformation. Proc. 18th. Int. Conf. on Coastal Enf., 1439-1459.
- 島谷 学, 中瀬浩太, 熊谷隆宏, 月館真理雄 (2000) アマモ種子の埋没機構に関する研究. 海岸工学論文集, 47, 1171-1175.
- 島谷 学, 中瀬浩太, 中山哲蔵, 太田雅隆, 月館真理雄, 星野高士, 内山雄介, 灘岡和夫 (2001) 人工リーフ設置による外力場の変化とアマモ分布条件との関係について. 海岸工学論文集, 48, 1156-1160.
- 島谷 学, 中瀬浩太, 岩本弘之, 中山哲蔵, 月館真理雄, 星野高士, 内山雄介, 灘岡和夫 (2002) 沖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, 1161-1156.
- 島谷 学, 中瀬浩太 (2004) アマモや二枚貝の外力検討におけるシールズ数の算定

- 方法について. 日本水産工学会学術講演会講演論文集, 16, 111-114.
- 島谷 学 (2007) 富津海岸におけるコアマモの物理的生育環境について. 海岸工学論文集, 54, 1071-1075.
- 清水琢三, 野谷 斎, 近藤浩右, 西 祐二, 山本生明 (1989) 海浜変型予測手法の現地適応性に関する研究. 海岸工学論文集, 36, 404-408.
- 清水琢三, 近藤浩右, 渡辺 晃 (1990) 局所漂砂量判定式の現地適用性に関する研究. 海岸工学論文集, 37, 274-278.
- 杉本憲司, 木下咲菜, 高嶋ひかる, 高田陽一, 吉木圭介, 岡用光正 (2019) 波浪抑制によって拡大したアマモ場の長期的な分布変化及び生物多様性評価. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 75(2), I_516-I_521.
- 高山百合子, 片倉徳男, 伊藤一教, 国分秀樹, 前川行幸 (2014) シート基盤を利用したコアマモ移植方法の適用に関する実験. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 70(2), I_1201-I_1205.
- 竹山佳奈, 河野裕美, 蔵持登士江, 岩崎彩加, 村上智一, 木村賢史, 鶴飼亮行, 中瀬浩太 (2014) 西表島北西部における熱帯性海草ウミシヨウブの広域分布および生育環境条件について. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 70(2), I_1068-I_1073.
- 田中 仁, Ahmad Sana (1996) 交差する波と流れによる抵抗則の検討. 土木学会論文集, 533/II-34, 273-277.
- 田中 仁, 首藤伸夫 (1980) 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験. 第27回海岸工学講演会論文集, 163-167.
- 田中裕一, 中瀬浩太, 今村 均 (1992) アマモ場造成手法に関する研究. 日本水産工学会学術講演会講演論文集 1992, 15-16.
- 寺脇利信, 新村陽子, 梶田 淳, 松村 航, 玉置 仁, 吉田吾郎 (2009) 屋外水槽におけ

- る海草アマモの 10 年間の栽培経過と葉部流失量の実測. 日本水産工学会学術講演会講演論文集, 21, 171-172.
- 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. 日本水産工学会誌, 42(2), 151-157.
- 照屋雅彦, 酒井洋一, 具志良太, 與儀成也, 坂井隆行, 池田宗平, 加地智彦, 細谷誠一 (2011) 熱帯性海草類の生育場創出による藻場造成実証実験. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 67(2), I_298-I_303.
- 時岡 隆, 原田英司, 西村三郎 (1972) III. 海洋における生物群集の構造・分布・維持. 海の生態学, 188-295, 築地書館, 東京.
- 当間 武 (2012) 沖縄の海藻と海草. 41-43, 出版舎 Mugen, 沖縄.
- 土田 孝, 浅海綾一, 一井康二 (2006) 波浪による一次元水圧変動下のアマモ場海底地盤の安定性. 海岸工学論文集, 53, 1251-1255.
- 鵜飼亮行, 河野裕美, 中瀬浩太, 島谷 学, 神野正樹, 木村賢史 (2010) 網取湾のサンゴ生息環境に及ぼす波浪外力の影響. 海洋開発論文集, 26, 363-368.
- 海の自然再生ワーキンググループ (2003) 第 3 巻 藻場編. 海の自然再生ハンドブック, ぎょうせい, 東京, 16 p.
- 渡辺 晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 榊山 勉 (1984) 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル. 第 31 回海岸工学講演会論文集, 406-410.
- 山本省吾, 中瀬浩太, 山本裕規, 羽原浩史, 岡田光正 (2004) 光量, 航走波, 潮流環境変化による移植アマモ場の維持・拡大機構に関する研究. 海岸工学論文集, 51, 1041-1045.
- 湯浅城之, 上野成三, 高山百合子, 織田幸伸 (2006) コアマモ場の干潟地形安定化効果に関する二次元水理実験. 海岸工学論文集, 53, 496-500.