分布特性の異なる2つのアマモ場における物理環境現地観測

誌名	水産工学研究所技報
ISSN	13418750
著者名	森口,朗彦 高木,儀昌 仲宗根,琢磨 吉川,浩二 園,昭紀 和泉,安洋
発行元	水産庁水産工学研究所
巻/号	21号
掲載ページ	p. 1-12
発行年月	1999年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

水工研技報　21, 1〜12,　平11
Tech Rept. Nat. Res. Inst. Fish. Eng. 21 1–12, 1999

分布特性の異なる２つのアマモ場における物理環境現地観測

森口朗彦*・高木儀昌*・仲宗根琢磨**・吉川浩二***・團　昭紀****・和泉安洋****

Field Observations of Physical Environment at Two Eelgrass Beds Vary Regarding Distributional Characteristics

Akihiko Moriguchi, Norimasa Takagi, Takuma Nakasone, Koji Yoshikawa,
Akinori Dan, andYasuhiro Izumi

Abstract: Eelgrass beds (*Zostera Marina L.*) are important from the viewpoint on not only fisheries but also environmental resources, but they have been disappearing very rapidly. So we have been studying a method of Eelglass beds creation which can be apply to the area with comparatively hard disturbance by wave-action, minimize impacts without the effect on this creation against the region roundabout and be low-cost.
To obtain fundamental information on this study, we conducted observations of the physical environment factors (wave hight, current, sandy bottom, etc.) at two eelglass beds, and examined the relationship between the Shelds numbers on eelgrass beds and the distributional charactaristics of eelgrass.

Keywords *: Eelgrass bed, Physical environment, Field observation, Shields number*

1　緒言

アマモは浅海砂泥域に生息する顕花植物の一種である。その群落であるアマモ場は、水産生物の産卵場や幼稚仔の保護育成場、成体の摂餌・生息場としての機能、あるいは海域の浄化機能を有する等、水産面ばかりでなく環境保全の観点からも重要な資源と言える。

しかし、アマモ場の消失は著しい。理由は、アマモの好適水深が埋立地造成適正水域に含まれ、近年までの経済活動優先の風潮により、アマモ場が埋め立て地にされたことがまず挙げられる。加えて、汀線が人工構造物に取って代わられ、海岸における波浪エネルギーの吸収が減少し、擾乱が激しくなり、海象条件がアマモの生息に厳しくなった。同時に砂浜域の侵食が激しいことも一因であろう。

近年、食糧供給への危機感と環境保護への関心の高まりを背景に、浅海域においてアマモ場再生の必要性が論じられており、各所でその試みもされている。しかし、その多くは単純な播種や移植などで、静穏な海域に適用が限られているものか、あるいは埋め立て等の大規模開発の補償として離岸堤、潜堤等の設置による比較的大規模な環境改変に伴うアマモ場再生である。

著者らは、比較的海象条件の厳しい海域で、あまり大規模な施設を必要とせず、アマモ場造成周辺域の環境に与えるインパクトを最小限としたアマモ場造成手法の開発を進めている。

開発手法は、水理模型実験と現地調査を平行して行っているが、この現地調査フィールドとして分布特性の異なる2つのアマモ場を対象としている。一つは徳島県鳴門市郊外の櫛木浜地先（以下「櫛木浜」という）で、ここでアマモは小さな群落を形成し、それらがパッチ状に点在するという分布をしている。いま一つは山口県大島郡東和町の逗子ヶ浜地先（以下「逗子ヶ浜」という）で、濃密な群落を形成する区域と全く生育がみられない区域が隣接しており、両者には見かけ上アマモ場形成以外の差違はみられない。

これらのアマモ場において、アマモ場造成手法の基本的な

1999年4月12日受理　水産工学研究所業績A第368号
* 水産土木工学部漁場施設研究室
** 水産土木工学部開発システム研究室
*** 瀬戸内海区水産研究所
**** 徳島県水産試験場

機能と適用限界等について検討する基礎資料とするため、波浪等の物理環境の現地観測を行った。

本報では、その観測結果の概要、並びに観測結果に基づくアマモの場の物理環境特性とアマモの分布特性との関連についての若干の考察結果を報告する。

2 調査対象海域

2.1 位置と地形的特徴

(1) 櫛木浜

櫛木浜の位置を図1に示した。本地点は徳島県最北部に位置し、瀬戸内海の播磨灘に面する。図2に示したようにＮＮＥ方向に大きく開いた海岸で、海岸線の形状はやや湾形をしているが、ＮＮＥ方向からの波のエネルギーを遮蔽するものはほぼ無いと見てよい。吹送距離が最大となる方向はＮＮＥであり、兵庫県赤穂市付近の海岸を起点とした約60kmが波浪の発達区域となる。

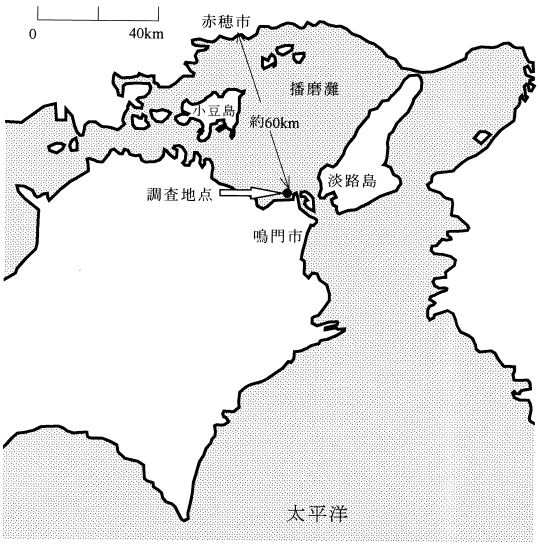

図1 櫛木浜調査地点位置

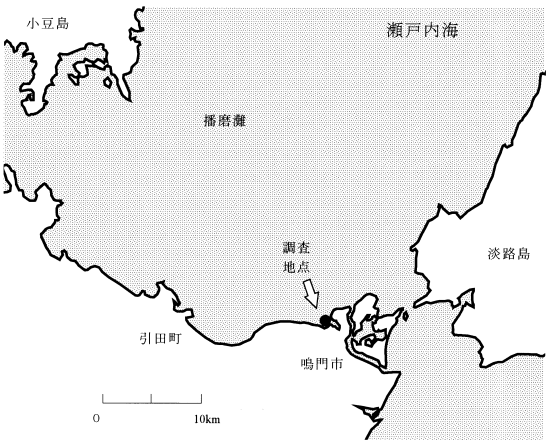

図2 櫛木浜調査地点の地形概要

(2) 逗子ヶ浜

逗子ヶ浜の位置を図3に示した。本地点は山口県南東部、瀬戸内海に浮かぶ屋代島の本州側東端近く、広島湾に面して位置する。図4に示したように、櫛木浜同様、ＮＮＥ方向に開いた海岸であるが、ＮとＮＥ方向に島が存在し、波エネルギーの遮蔽物となっている。吹送距離が最大となる方向はＮＮＥであり、広島県宮島町南東向き海岸を起点とした約40kmが波浪の発達区域となる。

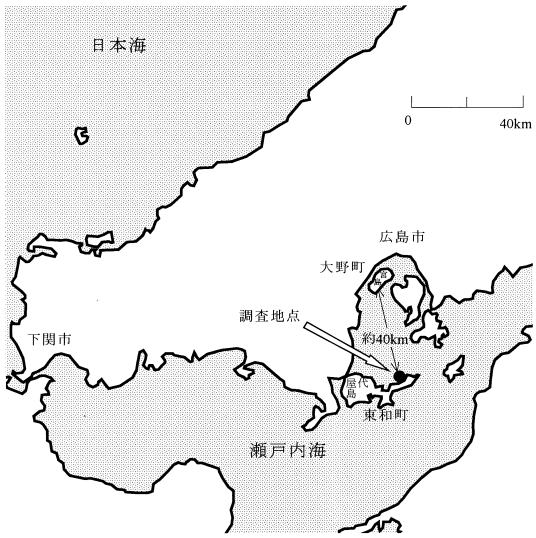

図3 逗子ヶ浜調査地点の位置

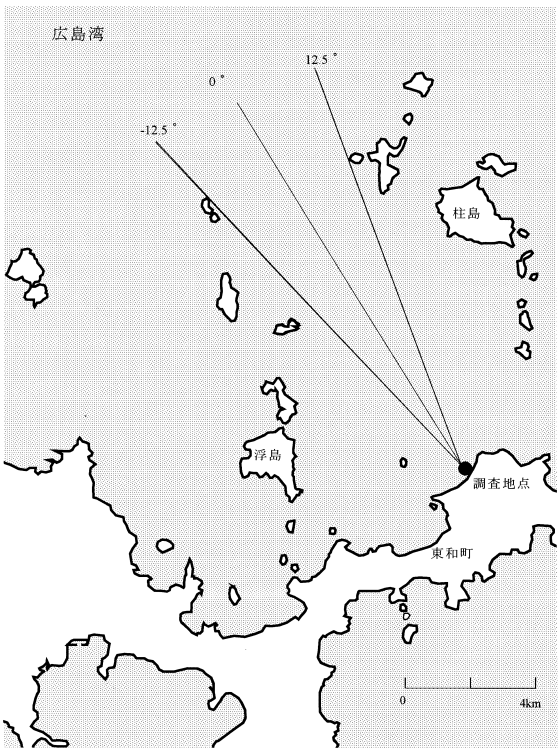

図4 逗子ヶ浜調査地点の地形概要

2.2　海岸の状況とアマモ分布状況

(1)　櫛木浜

調査フィールドの概要を図5に示した。海岸線は直立護岸となっており、消波工は設けられていない。砂浜はほとんど見られず、海底は直立護岸から数mの区間で底質が礫よりなる区間が水面部分から急な勾配で落ち込んでいる。その沖では、底質は砂質で、平均の海底勾配は1/40程度である。ここには地元水産会社の設置した桟橋状の構造物があり、その沖側先端部を観測の起点としている。本調査海域は、この起点より沖合80m 付近まで、水深としてはD.L.-5m 程度までとした。

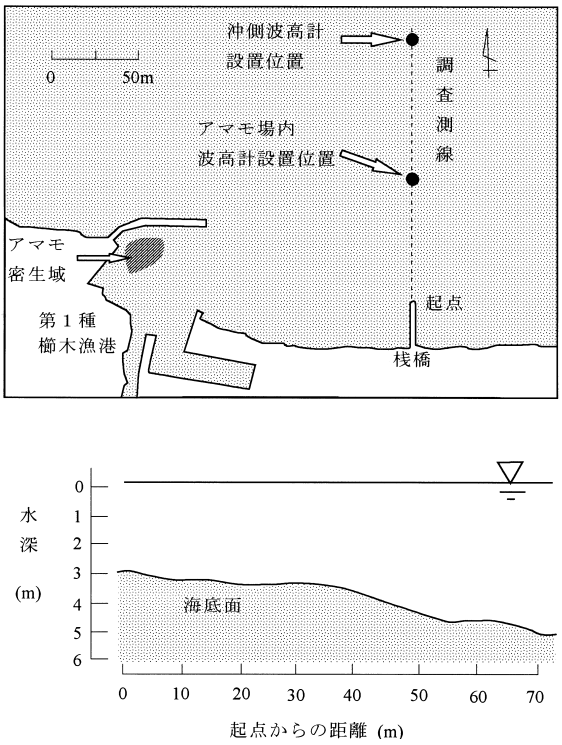

図5　櫛木浜調査フィールドの概要

団らの報告によると[1]、この海域におけるアマモの分布は起点より20～60m 、水深はD.L. -4～-5mの範囲にあり、数株から数十株からなる群落が散在するパッチ状の生育形態を示す。また、このパッチ状生育形態を出現させる主要因は、隣接の漁港内にはアマモが密生していること等から、波浪にあると考察している。

(2)　逗子ヶ浜

調査フィールドの概要を図6に示した。陸域には道路護岸が建設されており、そこから幅数mの砂浜海岸が形成され、それが緩やかに海中に没し、砂泥よりなる海底を形成している。海岸線の形状は、東西に小規模な岬状の地形が存在し、左右対称のややポケットビーチ的な海岸である。この海域の汀線より沖方向約60m 、水深にしてD.L.-4m 程度までを調査海域とした。

吉川らの報告によると[2]、この海域のアマモの分布態はここ数年変化しておらず、水深D.L.-2m 前後を中心に、岸沖方向最大約50m 、汀線方向約150mの横長のラグビーボール状のアマモ密生群落が形成されている。しかし、その汀線方向西側には、連続した同様の海岸であるにもかかわらず、アマモが全く生育しない海域が隣接する。外観上、この分布を異にする原因は、アマモ密生区と無生区に地形的な差違がなく、目視観察では特定し得ないと考察している。

3　物理環境観測の方法

3.1　観測期間

観測は年間を通じて行うことが望ましいが、観測機器の性能や予算、人員等の関係から困難であり、調査期間を絞る必要がある。

今回の調査は、おおよそ12月上旬から次年1月下旬を観測

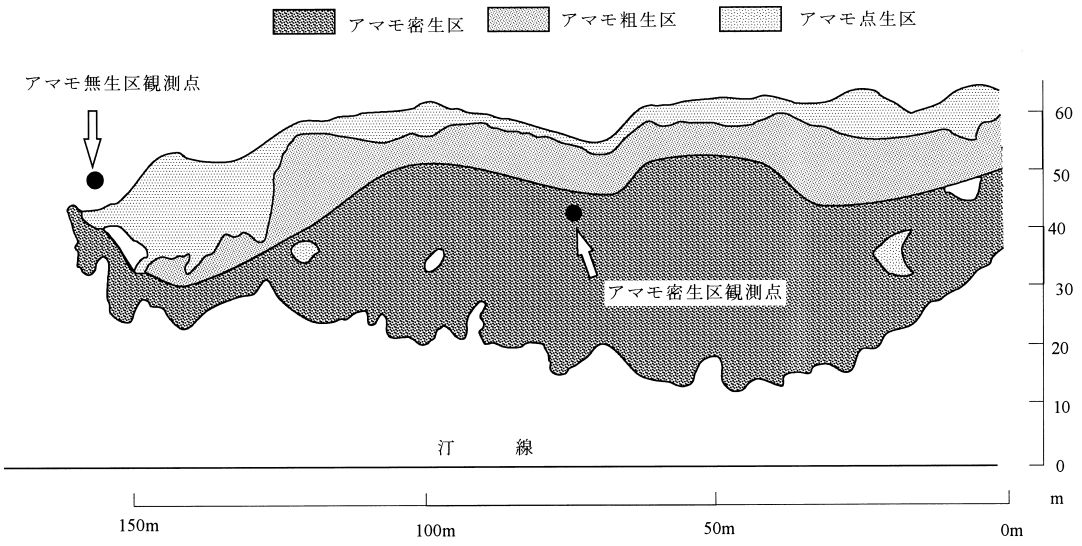

図6　逗子ヶ浜調査フィールドの概要

期間とした。この時期がアマモの種子の着底から発芽期に当たり[3]、この期間の物理環境がアマモ群落の形成に大きく影響することや、本調査地点のように北に向いた海岸では冬季に波浪が厳しくなることから、アマモ場形成の鍵となると考えられる。

また、通年観測が困難であるのと同じ理由で2地点の同時観測も困難である。このため、各地点での観測期間は、櫛木浜では1996年12月11日から1997年2月5日まで、逗子ヶ浜は1997年12月12日から1998年1月29日までとした。

3.2 観測項目と観測位置

(1) 櫛木浜

1) 波高・流速・水深

底設型自記式波高・流速計（アイオーテクニック社製Wave Hunter）2基を使用した。検出方式は、水面位置（波高・水深）については水圧式、流速については電磁式である。流速計センサーは、海底に設置した場合、海底面より約65cmの高さになる。データは、毎正時に0.5 秒間隔で10分間取得し、得られた波高、周期、波向、流速、流向、水深について統計解析を行った。

観測地点は、アマモ場が点在している区域内の沖寄り（アマモ場内観測点、起点より沖側約60m 、水深D.L.-5.0m）と、その沖（沖側観測点、同約130m、水深D.L.-7.6m ）の2点とした。

2) 底質面の高さ

光電式砂面計（三洋測器社製ＳＰＭ－Ⅲ、ＳＰＭ－7）2基を使用した。光電管の間隔、即ち測定精度は1cmである。データは、設置時を基準面とし、毎正時の底質面の上下方向の変動を取得した。

観測地点はアマモ場内波高計よりやや沖側（アマモ場沖砂面計、起点より沖側約65m 、水深D.L.-5.4m ）と水深としてアマモ場のほぼ中央（アマモ場中央砂面計、同55m、-4.4m）の2点でパッチ状群落からはずれている箇所とした。

3) 水温

小型自記式水深・水温計（アレック電子社製ＭＤＳ－ＴＤ）を用いた。データは、10分間隔で取得した。

観測地点は、波高・流速計の設置点と同地点とした。

4) その他

観測機器の回収時に、砂面計設置位置の底質を採取し、その粒度・比重分析を行った。

(2) 逗子ヶ浜

1) 波高・流速・水深

底設型自記式波高・流速計（協和商工社製多機能型海象観測装置ＤＬ－2）2基を使用した。検出方式は、波高については水圧式と超音波式の併用、流速については電磁式である。流速計センサーは、海底に設置した場合、海底面より約75cmの位置になる。データは、毎正時に0.5 秒間隔で10分間取得し、得られた波高、周期、波向、流速、流向、水位（水深）について統計解析を行った。

観測地点は、アマモが密生している区域のほぼ中心（起点より沖側約45m、水深D.L.-2.3m）と、アマモ無生区の密生区にやや近い位置（同約50m、水深D.L.-2.7m）の2点とした。両点は汀線方向に約80m 離れている（図6）。

2) 底質面の高さ

光電式砂面計（三洋測器社製ＳＰＭ－7）2基を使用した。データは、設置時を基準面とし、毎正時の底質面の上下方向の変動を取得した。

観測地点は、波高等の設置点と同地点とした。

3) 水温

小型自記式水深・水温計（アレック電子社製ＭＤＳ－ＴＤ）を用いた。データは、10分間隔で取得した。

観測地点は、波高計等の設置点と同地点とした。

4) その他

観測機器設置及び回収時に、観測機器設置位置で底質の採取を行い、粒度、密度及び強熱源量を分析した。

4 観測結果

(1) 櫛木浜

観測結果の一部を図7に示す。図は、上から波向き（北方向を0°、右周りを正にとった角度で表示）、有義波高$H_{1/3}$ 及びその周期$T_{1/3}$、波動流速振幅 $u_{1/3}$（1波当たりの最大流速と最小流速の差を1データとし、これを有義波の解析と同様に1/3最大平均処理したもの）、平均流速 u_{m}（全流速データの平均）、砂面位置（設置時を0として堆積を正、侵食を負で表示）である。

1) 水深と潮位

観測期間内の平均水深は、アマモ場内観測点で5.5m、沖側観測点で8.2mであった。潮位差は各々2.2m及び2.5mであった。

2) 波浪

波高1m以上となる時化は10回観測された。このときの波向きはＮＮＥ方向が卓越した。観測期間内における有義波高$H_{1/3}$の最大値及びその周期$T_{1/3}$は、沖側観測点で2.1m、5.8秒、アマモ場内観測点で1.8m、6.0秒であった。沖側の結果より、波高変化を浅水変形のみと仮定して沖波を逆算すると[4]、沖波波高H_{0} は2.3mとなり、このときの砕波水深h_{b}は3.4m程度となる。

内海域としては、かなり厳しい波浪条件である。

3) 流速

波動流速振幅$u_{1/3}$は、当然の事ながら波浪の強弱に伴って変動し、最大は沖側観測点で 0.6m/sec、アマモ場内観測点で0.9m/secであった。

平均流速u_{mean}は、波浪の激緩に追従するように生じており、最大は沖側、アマモ場内観測点とも0.1m/secであった。

4) 底質面位置変動

底質面位置は、波浪により急激に侵食され、静穏になると元に戻るという動きをした。最大侵食深さはアマモ場沖砂面計設置点で12cm、アマモ場中央砂面計設置点で 7cmであった。

5) 水温

水温は、観測開始時は15℃前後であったが、日を追うごとに直線的に低下し、観測終了時は 9℃程度にまで下がった。

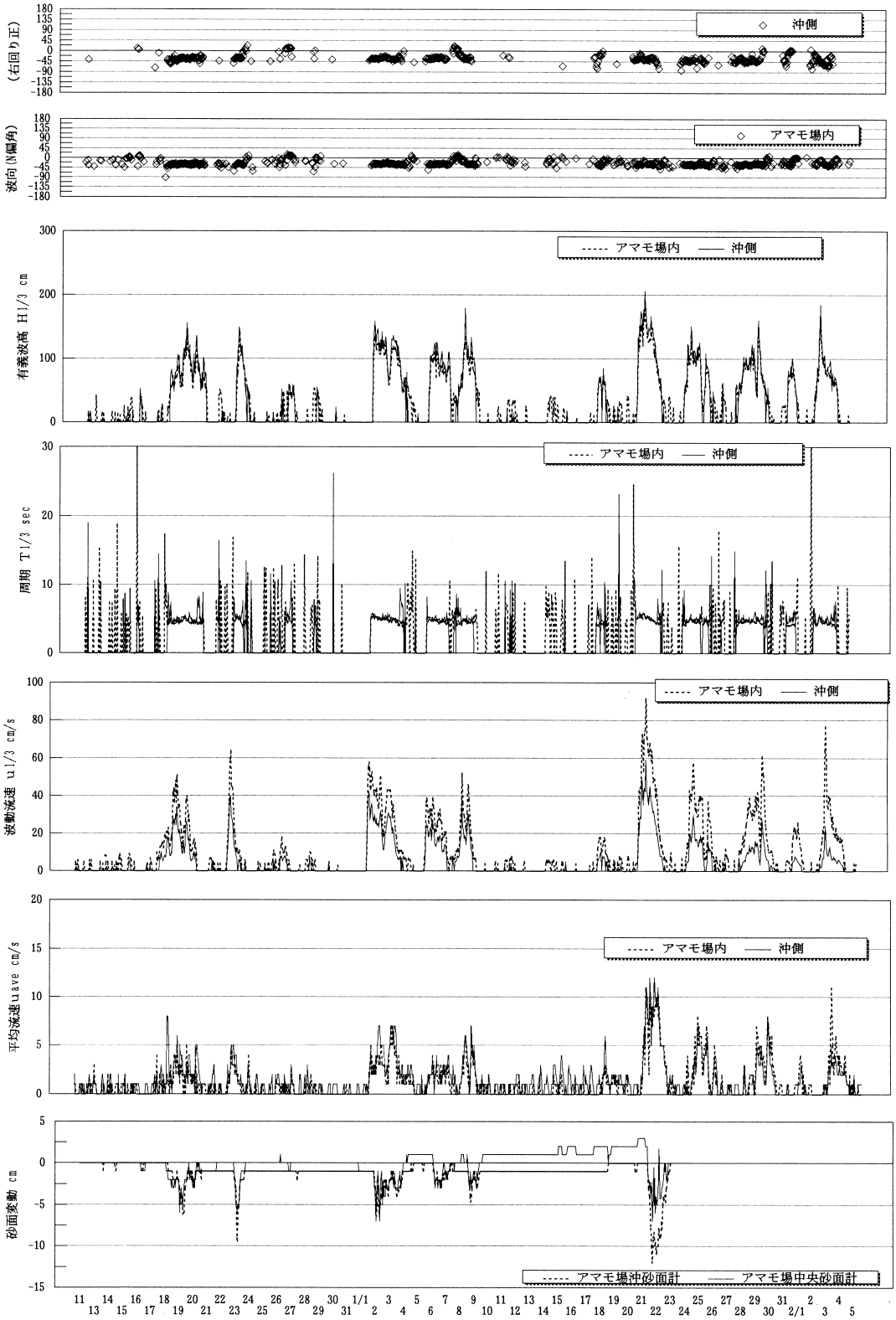

図7　櫛木浜における物理環境観測結果

6) 底質粒度・密度

粒度分析結果は、アマモ場沖砂面計設置位置（D.L.-5.4m）で中央粒径d_{50}が0.26mm、密度2.7g/cm³、アマモ場中央砂面計設置位置（D.L.-4.4m）で0.76mm、2.7g/cm³であった。

(2) 逗子ヶ浜

櫛木浜と同様の観測結果を図8に示す。波高は超音波センサーによる観測値と水圧センサーによる観測値があるが、低波高時には前者、高波高時には後者が信頼性が高いので、それを採用した。なお、水温については、観測データの回収ができなかった。

1) 水深と潮位差

観測期間の観測点の平均水深は、アマモ密生区で4.3m、無生区で4.7m、潮位差は両地点とも3.6mであった。

2) 波浪

観測期間中、有義波高$H_{1/3}$が1mを超えることはなかった。観測期間内における有義波高$H_{1/3}$の最大値及びその周期$T_{1/3}$はアマモ密生区、無生区ともに0.9m、4.0秒であるが、出現は一時的なものであり、継続しない。波高0.4～0.6m 程度が、この海域で現れる「波が荒れている状態」であろう。波向きはＮＮＥ方向が卓越した。また、アマモ密生区と無生区では、荒天時に波浪出現特性に差違は見られないが、静穏時にはアマモ密生区がやや静穏度が高い傾向がみられた。

3) 流速

平均流速u_{mean}において、アマモ密生区とアマモ無生区に顕著な差違が見られた。総じて無生区で大きく、最大値では密生区が0.13m/s であったのに対し無生区では0.30m/sであった。

なお、両地点とも平均速の大小は周期的に現れ、波浪が激しくなるとやや大きい方にシフトするという出現形態を示した。

一方、振動流速振幅$u_{1/3}$では差違は見られない。

4) 底質面位置変動

底質面位置変動については、アマモ密生区と無生区に顕著な差が見られた。密生区では、底質は安定しており、むしろ波浪の出現に伴って微少ではあるが堆積する傾向が見られる。一方、無生区では荒波浪時に急激に侵食される状況が見られ、その深さは最大12cmであった。静穏になると元に戻るが、すぐに回復する場合と時間を要する場合とがあった。

5) 底質粒度・密度

粒度分析結果は、観測機材設置前後で変化はなく、アマモ密生区（D.L.-5.4m ）で中央粒径d_{50}が0.30mm、密度2.7g/cm³、無生区で0.32mm、2.7g/cm³であった。

5 考察

5.1 両アマモ場における海象特性

(1) 波高出現頻度

櫛木浜沖側観測点と逗子ヶ浜アマモ無生区観測点における観測期間内の有義波高出現頻度を図9に示した。波高0.2m以下の静穏な期間はむしろ櫛木浜の方が逗子ヶ浜と比べて頻度が高い。波高が高くなるにつれて逗子ヶ浜では出現頻度は小さくなり1m以降は零となった。櫛木浜では、0.8m～1.0mの頻度がもっとも高く、ほぼ同様の頻度で1.0m～1.2m、0.6m～0.8m、1.2m～1.4mと続く。0.2m～0.4m、0.4m～0.8mの比較的小さい波高の出現頻度はむしろ少ない。この理由は、櫛木浜で使用した波高計は水圧センサーのみであるのに対し、逗子ヶ浜で使用したものは超音波と水圧の併用であり、小さい波高まで検出が可能であるためと考えられる。しかし、大きい方の波高の評価は、この観測結果で十分可能である。観測期間内に10%の確率で超過する波高は櫛木浜で1.2m、逗子ヶ浜で0.5mであった。

(2) 気象条件の比較

波浪の発達は、そのときの気象条件により決まる。今回の2地点での物理環境観測は異なる年に実施したが、この2つの結果を比較して論じることが可能か否かを検証するため、波浪推算法を用いて同様の気象条件から生じた波浪であるかを確認した。この際、最大波では偶発的要素が大きいので、10%超過確率の波を用いた。

櫛木浜沖側観測点における有義波高1.2mの波は、平均水位時で沖波波高に換算すると[4] 1.3mになる。この波を発生させるための気象状況をＳ-M-Ｂ法により推算すると、この海域の吹送距離60kmで同じ風速の風がＮＮＥ方向から波が充分発達するまで吹き続けたとしたとき、櫛木浜沖合に遮蔽物は皆無でありから、このときの風速は約10m/s と推算される。

ここで、同じ気象条件が逗子ヶ浜沖合で生じたとして、この海域の吹送距離40km、方向はＮＮＥで櫛木浜と同じであるので、同様にＳ-M-Ｂ法を用いると、沖波は1.1mにまで発達すると推算される。逗子ヶ浜はＮＮＥ方向に対して-12.5°～+12.5°の間以外は島等で遮蔽されているので（図8）、沖波がBretschneider－光易型の方向スペクトルを持つとすると、遮蔽される波のエネルギーは70%であり、この海域に到達する沖波波高は0.6mになる。この波は海岸線にほぼ垂直に進入するので、浅水変形のみを考慮すると、平均水深時での観測点での波高は0.5mと推算される。この波高は10%の確率で出現する波高の実測結果と一致している。

以上の結果から、櫛木浜と逗子ヶ浜の波浪条件の違いは主に地形的な要因によって、波浪の発達・伝達経路が異なることが理由であることがわかる。

さらに、両観測期間の波浪はほぼ同様の気象条件から生じたものであり、特異な状況ではないので、これらとアマモ分布特性とを比較検討しても良いと言える。

(3) 底質の安定性

底質の安定性を表す指標として、シールズ数Ψが用いられる。これは、底質を動かそうとする流体力を底質の抵抗力の比で、一般に次式で定義される。

$$\Psi = \tau/(\rho_s - \rho)gD \qquad (1)$$

ここで、τは流体力による底面せん断力、ρ_s及びρは砂と流体の密度、gは重力加速度、Dは底質の粒径である。

実際に計算で求める方法としては、丸山ら[5] がアマモ場造成適地の砂地盤安定度の推定手法として提案した下記の方法によることにした。

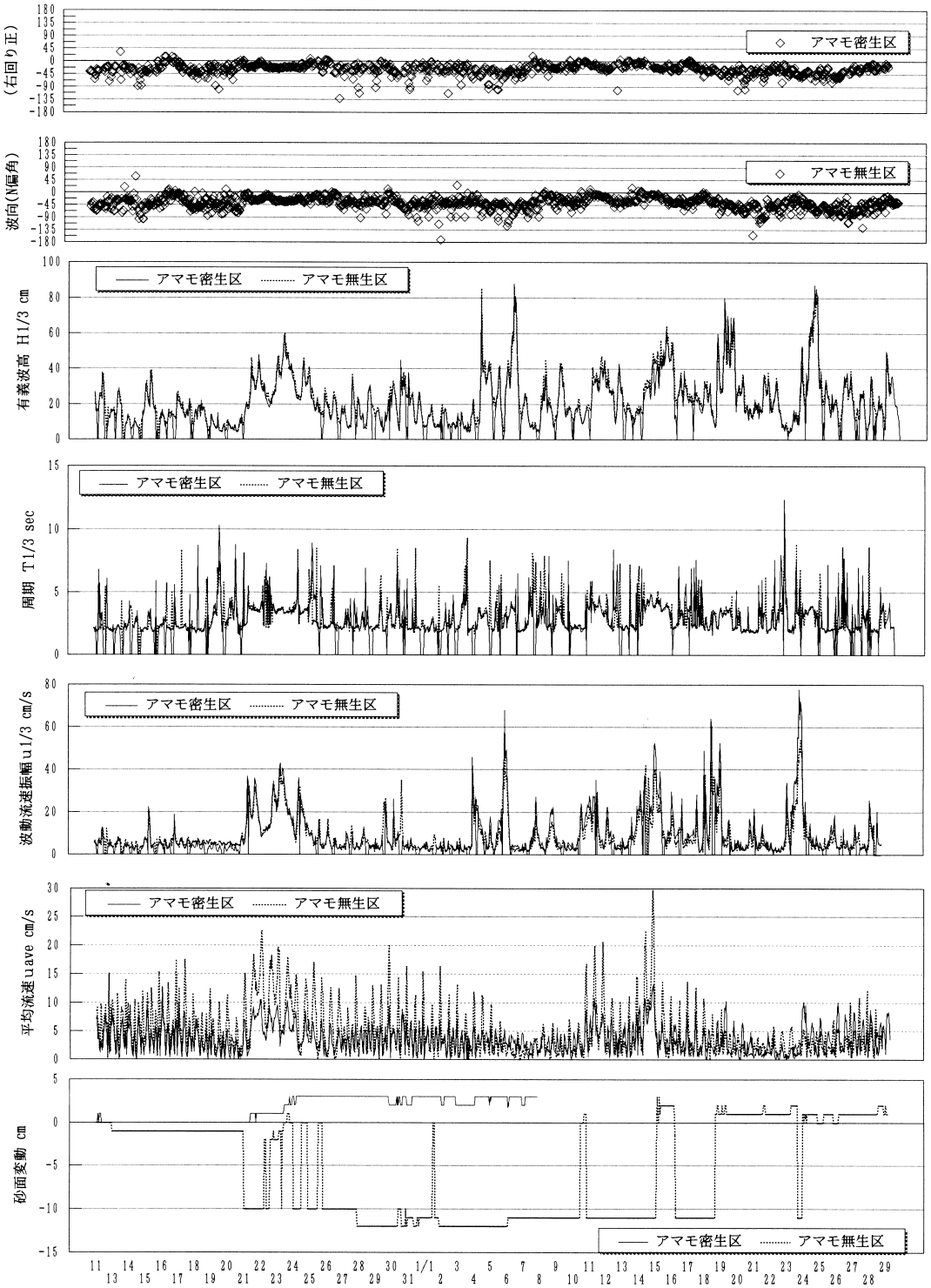

図8　逗子ヶ浜における物理環境観測結果

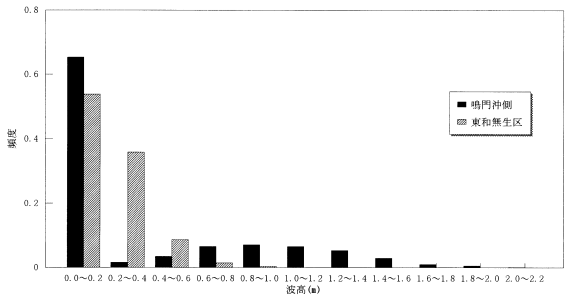

図9　波高出現頻度

① 流れ単独の場合

$$\Psi = \frac{u*^2}{(s-1)gD} \tag{2}$$

$$U/u* = 5.75\log_{10}(h/D)+6 \tag{3}$$

ここで、sは底質の比重、gは重力加速度、Dは底質の粒径、hは水深である。また、Uは水平流速を鉛直方向に平均した値、$u*$ は摩擦速度である。

② 波単独の場合

$$\overline{\Psi}_m = 0.5\Psi_m \tag{4}$$

$$\Psi_m = \frac{u*^2}{(s-1)gD} \tag{5}$$

$$u* = (0.5 f_w u_b^2)^{1/2} \tag{6}$$

ここで、$\overline{\Psi}_m$ は波のシールズ数 Ψ_m の一周期平均、u_bは波の底面流速振幅である。 f_w はJonsson の摩擦係数で次式で与えられる。

$a_{bm}/D < 1.57$のとき

$$f_w = 0.30 \tag{7}$$

$a_{bm}/D < 1.57$のとき

$$\frac{1}{4f_w^{1/2}} + \log_{10}\frac{1}{4f_w^{1/2}} = -0.8 + \log_{10}\frac{a_{bm}}{D} \tag{8}$$

ここで、a_{bm} は底面における水粒子の最大軌道半径で、波高H、波数kを用いて次のように求める。

$$a_{bm} = \frac{H}{2\sinh(kh)} \tag{9}$$

③ 波・流れ共存の場合

$$\Psi* = \Psi + \overline{\Psi}_m \tag{10}$$

このようにして求めたシールズ数の経時変化を図10に示す。なお、逗子ヶ浜においては底質面高さ及び底質粒度の観測位置は波高・流速観測位置と同一であるので、波による底面流速振幅は観測した波動流速振幅から微少振幅波理論に基づき求めた。櫛木浜地先においては、底質面高さ及び底質粒度の観測位置と波高・流速観測位置は異なるので、岸側波浪・流速観測点で観測した流速値を各砂面計設置点での値に水深の差を用いて換算し、底面流速振幅を求めた。

各地点の最大値は、櫛木浜アマモ場沖砂面計設置位置で0.32、アマモ場中央砂面計設置位置で0.27、逗子ヶ浜地先アマモ密生区で0.23、アマモ無生区で0.12であった。両海域とも波浪に起因するシールズ数の寄与が大きく、平均流の寄与は最大でも 2%にも満たない。平均的に櫛木浜の値が大きいのは波浪の強さの違いによるものである。

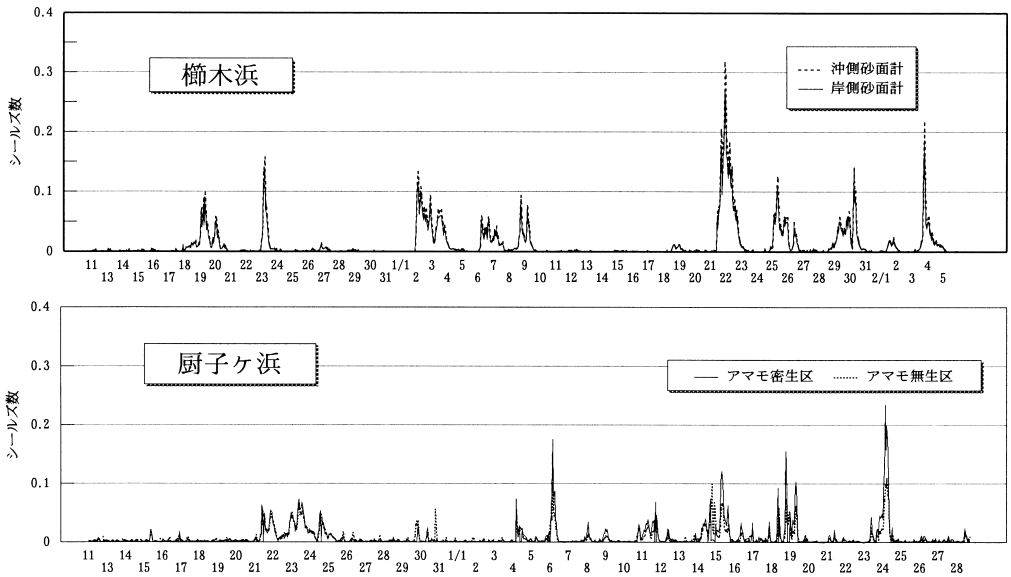

図10　シールズ数経時変化

5.2 アマモの分布特性と物理環境要因

(1) 既往報告との対比

日本水産資源保護協会[6]によると、アマモ場の形成条件の一つとして、有義波高1m以下であることを挙げている。

また、川崎ら[7]は移植によるアマモ場造成の適地条件の項目として底質面位置変動が通常2〜3cm以下、最大で10cm以下としている。

同様に、丸山ら[5]は底質面位置変動量が10cm以下となる条件としてシールズ数が0.08以下の場所が適地であると述べている。

中瀬ら[8]は、やはりシールズ数を指標としているが、波浪条件として年間を通じての沖波波浪データの90%超過値を用い、数値シミュレーションより対象とするアマモ場の物理環境特性を推算している。その結果と現存するアマモ場の分布状況、及び底質粒度の観測結果から、アマモ場のシールズ数が0.11から0.50であったとしている。

有義波高が1m以下の条件では、櫛木浜は不適、逗子ヶ浜は適ということになる。櫛木浜において有義波高1mを超える期間は全観測期間の10%で、このことは濃密なアマモ場の形成阻害要因が波浪にあるとする推定の裏付けとなる。しかし、逗子ヶ浜での密生区と無生区の差違を説明するものではない。

シールズ数では丸山らの条件では全観測地点が不適であり、この値が上限であるとするとアマモ場は形成しないはずである。なお、シールズ数が0.08を超えて期間の割合は櫛木浜アマモ場沖砂面計設置で 3.8%、アマモ場中央砂面計設置位置で 3.1%、逗子ヶ浜アマモ密生区で 1.4%、無生区で0.5%となった。一方、中瀬らの条件では、全観測地点が適となり、密なアマモ場が形成されていてもよい結果となる。

砂面変動量は逗子ヶ浜アマモ密生区のみで最大 3cmと適正範囲内となっている。

以上のように、既往報告のアマモ場形成条件と対比しても今回の観測結果とアマモ場分布特性との関係を説明し得ない。アマモ場が形成されない要因を明確にするため、群落の維持及び種子の出芽という2つの観点から考察を進める。

(2) アマモ群落の維持と物理環境要因

前節の結果より、逗子ヶ浜のアマモ密生区に密生したアマモ場が維持される直接的な要因は、底質面位置変動が小さいためであることがわかる。このことは、海水流動により砂泥の移動をアマモが防いでいるとするアマモ場の生態特性と一致する[3]。しかしながら逗子ヶ浜のアマモ密生区と無生区のシールズ数を比較すると、密生区の方が大きな値を示した。このことは、密生区の方が底質が不安定であることを意味し、底質面変動位置の観測結果と異なる。この現象が生ずる原因としては、シールズ数の計算の際、観測機器の流速センサーの位置で計った波動流速振幅を微少振幅波理論に基づき底層流速に換算したため、アマモが密生している場では以下の理由により実際の値よりも過大に評価していることが考えられる。すなわち流速計センサー付近では、アマモ草体は振動流の抵抗体となっていないことは、密生区と無生区の波動流速振幅の観測結果に差違がないことから分かる。これはアマモが振動流に逆らわずに揺れ動くためであろう。しかし底層付近の茎あるいは地下茎は動かないため、流速に対する抵抗物体となる。これを考慮していないため、実際の底層流速よりも大きく見積もっている可能性がある。加えて、実際の底層流速が小さいことから、粒径の小さい底質がこの場に保持されることも原因して相乗的にシールズ数を大きく見積もっているのであろう。

見方を変えれば、アマモ場にアマモが密に存在することにより底層流速を抑え、アマモが自らの着生基質である底質を安定させることによりアマモ場が維持されていると考えられる。現地調査時に漁業者からの聞き取りによると、逗子ヶ浜周辺海域は過去、海苔網漁業が盛んに行われており、アマモ場が現在よりも広く分布していたとのことであった。海苔網というエネルギー吸収体により冬季には波浪が抑えられ、生育に適した条件が整っていたが、海苔養殖業の衰退に伴い環境条件が厳しくなり、アマモ場は縮小した。そして、アマモ場自体の底質安定機能によりアマモ場が維持できる条件の場所のみがかろうじて残ったものと推察される。

アマモ場内において、式(1) に示した定義どおりのシールズ数がどのような値を示すのか、すなわち実際の底質の安定度がどの程度であるのかを実証するためには実際にアマモ場内の底層流速を計測することが必要であるが、流速が大きいときの底層付近では浮遊砂が多く、このような条件下では今回用いたような電磁式あるいは超音波式の流速計では観測が難しい。また、流速計はセンサー部が大きく、周囲にある程度の流れの場が必要となることから、現地観測では本当の底層流速は計測し得ないであろう。室内実験による方法は、アマモ場の再現と相似則の確保という点でさらに困難である。

なお、この場のアマモの繁殖方法としては、栄養株による地下茎の成長・分岐活動によるものだけでなく、底質安定と同様の機構で種子をトラップし、場内で発芽・成長するものもあると考えられる。

一方、櫛木浜では、前述の團らの報告によると、春期にパッチ状に育成したアマモの大部分は秋期の波浪により流出・消滅する。また、数年維持されるアマモ場は、その根を大きな礫や古い根の固まりに絡ませて自身を保持しているとも報告している。このことから櫛木浜の厳しい波浪条件下ではアマモ場の底質安定機能をもってしても底質は安定しないが、他の安定した物体に頼ることで草体を維持することができることが推察される。実際に大小不揃いの底質層中や障害物に遮られながら伸長した多数の根は相互に絡まり合い、また底質抱え込んでいるように見え、その効果をもっているようであるとする観察もある。

櫛木浜アマモ場沖の砂面計設置位置でアマモ場が形成されにくい原因については、底質の不安定さからくるものか、あるいは水深が深くなることによる光量不足からくるものかは定かではない。

(3) 種子の着底・出芽と物理環境要因

ここでいう出芽とは、アマモ種子が着底した後、発芽し、その芽が底質上に出て目視で確認できる状況をいう。

川崎らは別報において[9]種子上の底質の厚さが 9cm以上に

なると全く出芽しないことを培養実験により確認した。すなわち、底質の安定性が出芽に影響することは明らかである。

逗子ヶ浜アマモ無生区では、出芽は少ない。近隣に濃密なアマモ場が存在することから種子の供給は多量にあるにもかかわらず、環境条件が出芽を抑制していると考えられる。しかし、櫛木浜ではパッチ状とはいえ出芽し成長している。シールズ数を比較すると平均的な値でも最大値でも櫛木浜が大きく、底質はより不安定である。

このことは、おそらく平均流速観測結果に現れた平面的な流速分布特性の相違によるものと推測される。すなわち両地点の平均流の出現形態を比較してみると、前述のように、櫛木浜では波浪の激しくなると流速値も大きくなる傾向があることから、この海域の流れは波浪に伴うラディエーションストレスの平面的分布を機動力とする海浜流が主であることがわかる。一方、逗子ヶ浜では一定の周期で平均流が生じており、波浪に追従する傾向はわずかであることから、この海域の流れは潮汐を機動力とする潮流が主である。

調査値点全体を鳥瞰する視点で見ると、潮流は平面的に方向が一様であり、ある海域から流れにより持ち去られたものは2度と戻って来ない。一方、海浜流は、しばしば循環流となることが知られており、この海域より流れにより運ばれたものは海域内で滞留している可能性がある。

また、局所的に見ると、潮流はやはり一様流であるが、海浜流は、根本的には地形の起伏に起因するものであるから、地形の微細構造により底層での平均流速が0に近くなる吹き溜まりのような箇所が多数生じる可能性がある。再度、團らの報告を参照すると、櫛木浜の底質は砂あるいは砂礫であり、粒度の小さい砂泥はパッチ状に形成されたアマモ群落の中で見られるとしている。このような流れの滞留する箇所に比較的軽いアマモの種子が移動・着底し、出芽しているのではないかと考えられる。

シールズ数は底質の安定性、すなわちどの程度底質が巻き上げられるかを示すが、巻き上げられたものの移送は平均流が担う。

したがって、一旦着底したアマモ種子は、底質が櫛木浜程度に不安定性が高い状況にあっても出芽することが可能であるが、底質に着底できるかどうかについては平均流場の特性に影響されることが推察される。この考えが正しいとすれば、アマモ種子の着底、出芽を評価するには底質の安定性だけでなく平均流の有り様も考慮する必要が生じるが、これを実証するには流速の多点観測等のさらに詳細な検討をしなければならないであろう。

なお、櫛木浜のパッチ状アマモ場の形成要因について、一般に粒子の細かな砂泥は有機物質の割合が高く、これら栄養分に富む物質がアマモ種子と一緒に吹き寄せられた結果、施肥の役割を果たし、出芽が促されている可能性もある。

(4) アマモ場内の物理環境と造成適地の指標

以上の結果より、アマモは底質が安定していれば櫛木浜のような比較的厳しい条件下でも草体は折れたりちぎれたりすることなく存在しうることから、底質の安定性が群落の維持に大きく関係しており、この底質の安定性を示すシールズ数をこれらの現象を表す指標として用いることの合理性は明らかである。しかし一方で、アマモ場内で求められたシールズ数はアマモ場内の底質の安定性を示していないことも、逗子ヶ浜のアマモ密生区と無生区の観測結果の比較で明らかになった。

これらから言えることは、アマモ場内の物理環境と造成適地の指標とは別個に考えなければならないということである。中瀬らは前述の報告において、丸山らの提唱したアマモ場造成適地指標としてのシールズ数0.08を自らの観測・調査結果である0.11から0.50と比較し、丸山らの調査フィールドはかなり底質の安定した場所であると評している。しかし、この0.08という値は室内実験等により洗掘深さが10cm以下、これは地下茎が露出し草体が保持できなくなる限界値であるが、それを示したものである。したがって、中瀬らの行った現存のアマモ場における底質粒径と波浪条件から計算した方法による値とは単純に比較できない。

中瀬らの算定方法は、逗子ヶ浜アマモ密生区のものと同じであり、その値は現存のアマモ場の育成限界を表すものとしてとらえることができる。物理環境条件が何らかの要因で変化し、見かけ上のではあるがアマモ場のシールズ数がある値を超えると、そのアマモ場は消失する。このときの限界値が中瀬らの算定結果では0.50となる。

他方、丸山らの値はアマモの無い海域において、移植等の工学的な環境改変工法を用いないアマモ場造成を行う際の指標となるが、アマモ場自身の持つ底質安定機能を評価していないことから、造成適地の基準としてはやや厳しい安全側の値であると考えられる。波浪等の再現確率を十分考慮することにより、さらに厳しい環境条件下でも造成は可能であろう。この提案値は、アマモ場が完全に形成される前に生じてはならない条件、土木工学的な表現を用いれば施工途中における安全基準として考えることができる。

今回の観測結果等からは、アマモ場自身の持つ底質安定機能を考慮した、工学的環境改変を伴わない造成工法の適地基準として、シールズ数0.12を提案することができる。これは、逗子ヶ浜のアマモ無生区で観測したシールズ数の最大値である。隣接するアマモ密生区と地形的に差違はなく、物理環境条件の厳しさは同一と考えられること、この条件が生じた前後で密生区のアマモ育成状況に変化が見られなかったこと、したがってこの無生区に濃密なアマモ場が形成されていれば今回観測したような海象条件が発生してもアマモ場は隣接の密生区同様、維持されるものと考えられるためである。ただし、逗子ヶ浜アマモ無生区のようにこの限界値付近の条件下では、自然状態でのアマモ場の回復は期待できないことから、再現確率について十分配慮する必要がある。

注意すべきことは、今回の観測は冬季に限定しているため、夏期のアマモが枯れる時期に底質安定機能が発揮するかどうか疑問が残ることである。さらに詳細な知見が得られるまでは、冬季風浪が最も厳しいという条件が成立する北向きの海岸のみに適用すべきであろう。一方で、今回の観測期間内に出現しなかったさらに厳しい条件下でもアマモ場が維持される可能性があることから、この意味ではやや安全側の値であ

表1　観測された主要データ

			物理環境要因						底質			
			水深 (m)	潮位差 (m)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	波動流速振幅 $u_{1/3}$ (m/s)	平均流速 u_{mean} (m/s)	底質面侵食量 (m)	中央粒径 d_{50} (mm)	密度 (g/cm³)	シールズ数 (－)
鳴門市	沖側	最大	－	2.2	2.1	5.8	0.59	0.12				
櫛木浜		10%超過	－	－	1.2	5.2	0.22	0.04				
		平均	8.5	－	－	－	0.01	0.01				
	アマモ場内	最大	－	2.5	1.8	6.0	0.92	0.11				
		10%超過	－	－	1.1	5.2	0.40	0.04				
		平均	5.5	－	－	－	0.10	0.01				
	アマモ場沖	最大	－						0.12	－	－	0.32
		10%超過	－						－	－	－	0.05
		平均	5.9						－	0.26	2.7	0.01
	アマモ場中央	最大	－						0.07	－	－	0.27
		10%超過	－						－	－	－	0.05
		平均	6.1						－	0.76	2.7	0.01
東和町	アマモ密生区	最大	－	4.3	0.9	4.0	0.78	0.13	−0.03	－	－	0.23
逗子ヶ浜		10%超過	－	－	0.5	3.6	0.25	0.08	－	－	－	0.03
		平均	4.3	－	－	－	0.09	0.04	－	0.30	2.7	0.01
	アマモ無生区	最大	－	4.3	0.9	4.0	0.55	0.30	0.12	－	－	0.12
		10%超過	－	－	0.5	3.6	0.23	0.11	－	－	－	0.03
		平均	4.7	－	－	－	0.09	0.05	－	0.32	2.7	0.01

ることも示唆しておく。

また、さらに物理環境の厳しい海域でも、櫛木浜アマモ場中央砂面計設置位置に根を絡ませることのできる安定した物体を与えることでアマモ場を形成することができる可能性がある。その適応限界値は、今回の調査だけでは確定できないが、櫛木浜アマモ場中央砂面計設置位置でのシールズ数0.27までは可能であると思われる。

種子からの出芽に関しては、種子を底質に何らかの方法で安定させてやれば、櫛木浜のような比較的厳しい条件下でもアマモ種子は出芽することが、前述の結果から分かる。その限界値は、やはり櫛木浜アマモ場中央砂面計設置位置でのシールズ数0.27が今回の観測からは提案できる。

6　結言

本報では、アマモが小さな群落を形成し、その小群落が多数パッチ状に分布するという分布特性を持つ徳島県鳴門市櫛木浜地先のアマモ場と、濃密な群落と全く生息が見られない箇所が地形的に差違の無い場所に隣接するという分布特性を持つ山口県大島郡東和町逗子ヶ浜地先のアマモ場において、そのアマモの分布特性と物理環境との関連について、現地観測に基づき考察した。観測結果の主要な値を表1に示す。

本報告の結果をとりまとめると、以下のようになる。

①　アマモ場は、ある程度物理環境条件の厳しい海域でも、自身の持つ底質安定機能により、その群落を維持することができる。この限界の目安として、今回の観測結果からはシールズ数0.12が提案できる。ただし、アマモがある程度密生することが必要であり、さらにこの限界条件付近では一度消滅したアマモ場は回復しないことから、公共事業で設置される施設等のような耐用年数と同様な考えからアマモ場が維持されることを期待する年数を設定し、シールズ数の再現確率を求めて設定年内にシールズ数がここで提案した値を超えないようにしなければならない。

②　①以上に厳しい物理条件の海域でも、アマモが根を絡ませることができる安定した物体を与えることにより、アマモ場を維持することができる可能性がある。この限界の目安として、今回の観測結果からはシールズ数0.27が提案できる。

③　少なくともシールズ数0.27までであれば、種子を底質に安定させることによりアマモは出芽する。ただし、同時に施肥が必要な可能性もある。また、自然状態で種子が着底するか否かは、平均流場の特性によることが推察された。

今後は、これらの知見を深めていくとともに、海域に適したアマモ場造成手法の開発を進めていく。

最後に、徳島県北灘漁業協同組合及び山口県東和町漁業協同組合には多大なご協力と調査フィールドの特性に関する多種多様な情報を頂いた。また瀬戸内海区水産研究所寺脇利信博士には貴重なご助言を賜った。ここに記して謝意を表する。なお、本調査は水産庁沿岸漁場整備開発調査の一環として実施したことを付記する。

参考文献

1) 圍　昭紀・森口朗彦・三橋公夫・寺脇利信：鳴門地先におけるアマモ場と底質及び波浪の関係，水産工学，34(3),299-304,1998
2) 吉川浩二・有馬郷司・寺脇利信・吉田吾郎：藻場造成の持続化技術の開発，平成7年度沿岸漁場整備開発事業に関する水産庁研究所研究報告書，水産庁振興部開発課，1997
3) 徳田　廣・大野正夫・小河久朗：海藻資源養殖学，緑書房，230-246,1986
4) 水産庁監修：沿岸漁場整備開発事業施設設計指針（平成4年度版），（社）全国沿岸漁業振興開発協会，16-62,1994
5) 丸山康樹・五十嵐由雄・石川雄介・川崎保夫：電源立地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手法－，電力中央研究所報告，U87069,1987

6) 日本水産資源保護協会：アマモ類，環境が海藻類に及ぼす影響を判断するための「判断基準」と「事例」，38-47,1992
7) 川崎保夫・飯塚貞二・後藤　弘・寺脇利信・渡辺康憲・菊池弘太郎：アマモ場造成法に関する研究，電力中央研究所報告，総合報告U14,1987
8) 中瀬浩太・檜山博昭・田中裕一：アマモ場造成工法の開発（その1），五洋建設技術研究所年報，Vol.20，1991
9) 川崎保夫・山田貞夫・本多正樹：電源立地点の藻場造成技術の開発第10報－播種によるアマモ場造成法－，電力中央研究所報告，U87069,1987