

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.49 No.3 September 2010

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 49 卷 第 3 号 (Vol. 49, No. 3), 2010年9月 (September 2010)

目 次 (CONTENTS)

微小溶存酸素分布を比較対象とした摩擦速度推定手法の評価 —底面境界層における乱流と溶存酸素の同時観測— ……………井上徹教・Ronnie N. GLUD・Henrik STAHL・Andrew HUME …… 3 (Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles - Simultaneous field observation of turbulence and DO in the benthic boundary layer - …………… Tetsunori INOUE, Ronnie N. GLUD, Henrik STAHL, Andrew HUME)	3
アマモ分布域の拡大とそれを支える種子散布 ……………細川真也・仲岡雅裕・三好英一・桑江朝比呂 …… 31 (Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, <i>Zostera marina</i> L. …………… Shinya HOSOKAWA, Masahiro NAKAOKA, Eiichi MIYOSHI, Tomohiro KUWAE)	31
網チェーン把持装置によるブロック撤去及びその把持モデルの開発 ……………野口仁志 …… 51 (Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling ……………Hitoshi NOGUCHI)	51
地震動波形の影響を考慮した液状化の予測・判定に関する提案 ……………山崎浩之・江本翔一 …… 79 (Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions …………… Hiroyuki YAMAZAKI, Shouichi EMOTO)	79
波形インバージョンにより推定された最近のわが国における内陸地殻内地震の震源過程 ……………野津厚 ……111 (Rupture Process of Recent Crustal Earthquakes in Japan Estimated by Waveform Inversion ……………Atsushi NOZU)	111
多チャンネル型表面波探査に基づいた干潟土砂堆積構造の評価 ～せん断波速度構造の考察と人工干潟安全管理手法の提案～ ……………渡部要一・佐々真志・桑江朝比呂・梁順普・田中政典 ……157 (Evaluation of intertidal flat stratigraphy by MASW technology — Interpretation of shear wave velocity structure and safety assessment of artificial intertidal flats — ……………Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Tomohiro KUWAE, SoonBo YANG, Masanori TANAKA)	157

アマモ分布域の拡大とそれを支える種子散布

細川真也^{*,**}, 仲岡雅裕^{***}, 三好英一^{*}, 桑江朝比呂^{****}

要 旨

久里浜湾と三河湾においてアマモ場の分布域の変遷を調査した結果, 久里浜湾では 27 年間で約 300 m 程度, 三河湾では 1.5 年で約 500 m の分布域拡大が見られた. アマモが水平方向に広がるメカニズムの一つである地下茎を伸ばして水平方向に広がる成長による拡大速度は, 高々 0.7 m year⁻¹ 程度であることから, これらのアマモ分布域拡大には, もう一つの拡大メカニズムである種子の拡がり (種子散布) が重要な役割を果たしていたことが強く示唆された.

アマモの種子散布には, 種子が親株の組織とともに水面を浮遊して遠くまで運ばれるメカニズムとその場に落下して底質輸送として運ばれるメカニズムが存在し, 前者については, 穂 (種子を含むコンポーネント), 穂の集合体 (穂が束となったもの), 生殖株 (穂やその集合体を含む一つの株) とともに輸送されると考えられてきたが, 実際には未解明の現象である. そこで久里浜湾において, 生育するアマモの生殖株における穂とその集合体の痕跡と汀線に打ちあがっている種子の状態について調査した. さらに, それらコンポーネントの浮き沈み試験を行った. その結果, 種子は穂とともに輸送され, 未成熟段階においては浮き, 成熟段階においては沈むことが明らかとなった. この浮き沈みには, 種子量が強く影響していることが示された. 生産された種子量とパッチ内に残存する種子量を比較したところ, 久里浜湾においては, 生産された種子は 1/2 から 1/3 が発芽時期 (翌年 1 月) までパッチ内に残存していることが明らかとなった. これより, アマモの種子は, 主にその場に落下して輸送されている可能性が高いことが結論付けられた.

キーワード: アマモ, 種子, 種子散布

* 海洋・水工部 主任研究官

** 北海道大学大学院 環境科学院 生物圏科学専攻 博士課程後期

*** 北海道大学 北方圏フィールド科学研究センター 厚岸臨海実験所所長 教授

**** 海洋・水工部 沿岸環境研究チームリーダー

〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話番号: 046-844-5046, Fax: 046-844-1274 E-mail: hosokawa@pari.go.jp

Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, *Zostera marina* L.

Shinya HOSOKAWA^{*,**}
Masahiro NAKAOKA^{***}
Eiichi MIYOSHI^{*}
Tomohiro KUWAE^{****}

Synopsis

The expansion rates of eelgrass (*Zostera marina*) meadow were more than 10 m year⁻¹ in Kurihama Bay and Mikawa Bay. These rates can not be explained by horizontal elongation rate (0.7 m year⁻¹) by clonal growth, which is a growth pattern for spatial expansion in eelgrass. This result suggests that seed dispersal, which is another growth pattern for the expansion, is more important in meadow expansion in eelgrass.

Seed dispersal of eelgrass consists of the rafting, which carries seeds through water surface in long distance by wind-induced current or wind, and the transportation onto sediments. As the former phase, seeds have been considered to be carried with spathe (a part of inflorescence), rhipidium (a group of inflorescences), or shoot (a unit including spathes and rhipidia) in previous studies, but no study demonstrated which components dominantly float and carry seeds. Our field measurements in Kurihama Bay demonstrated that spathe is the main component carrying seeds and that it floated in immature state and sank in mature state. The number of seeds in spathe was also detected as a factor causing spathe sinking. We also measured the produced and remained number of seeds in patches. By comparison between the both numbers, between 1/2 and 1/3 of the produced seeds remained in patches in germination season (next January) in Kurihama Bay. These results imply that dominant mechanism of seed dispersal was the bed load transport of seeds which dropped onto the sediment in the vicinity of reproductive shoots

Key words: Eelgrass (*Zostera marina*), Seed, Seed dispersal

* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department
** Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University
*** Director and Professor of Akkeshi Marine Station, Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University
**** Head of Coastal and Estuarine Environment Research Group, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5046, Fax : +81-46-844-1274 E-mail: hosokawa@pari.go.jp

目 次

要 旨	31
1. はじめに	35
1.1 アマモ場の消失と自律的回復	35
1.2 回復を支える成長パターン	35
1.3 研究の動機と着眼点	35
2. 湾スケールでのアマモ場の拡がり	36
2.1 はじめに	36
2.2 材料と方法	36
2.3 結果	38
2.4 考察	39
2.5 結論	39
3. 種子はどこに行くか？	39
3.1 はじめに	39
3.2 材料と方法	39
3.3 結果	41
3.4 考察	43
3.5 結論	44
4. 総合結論	44
5. おわりに	44
謝辞	44
参考文献	44
付録 A 用語の説明と生殖株のモジュール構造	47
付録 B 種子の密度とサイズ	47
付録 C 種子の発芽	48

1. はじめに

1.1. アマモ場の消失と自律的回復

アマモは、沿岸域に広く分布する我が国の代表的な海草であり¹⁾、カニや魚などの外敵からの隠れ家^{2),3),4)}や魚の餌となる付着藻の基質⁵⁾を提供するなど、沿岸生態系にとって重要な役割を担っている。しかしながら、海岸開発に伴う浚渫や埋め立てなどによるアマモ場の消失といった直接的な影響や水質悪化などによる間接的な影響は、その分布域の衰退を招き⁶⁾、近年においては、その減少傾向が加速度的に進行している⁷⁾。

このような背景をもとに、アマモ場などの海草藻場は、我が国^{8),9),10),11),12),13)}ならびに世界的¹⁴⁾に再生が試みられている。

アマモ場の消失が懸念される一方で、失われたアマモ場の自律的な回復も報告されている。例えば、フランスの Thau lagoon では貧酸素化によって消滅したアマモ場が、種子の発芽とその後の分枝や地下茎の延伸による平面的な拡がりによって速やかに回復した¹⁵⁾。朝鮮半島の南に位置する Jindong Bay では、赤潮による光環境の悪化によって全滅したアマモ場が、種子の発芽によって一年以内に完全に回復した¹⁶⁾。このような急激な藻場の回復には、種子からの発芽やわずかに生き残った個体による成長が寄与し、地下部に残存する地下茎が寄与することはない¹⁷⁾。

1.2. 回復を支える成長パターン

アマモを含む海草は、種子の生産およびその発芽による成長（再生産）と一つの個体が分枝や地下茎の延伸によって平面的に拡がる成長の二つの成長メカニズムを有している（図-1）。分枝や地下茎の延伸による成長は、ローカルな場所で占有面積を拡げることによって生存確率を高めて^{18),19),20),21)}その分布域を拡げる²²⁾のに対し、再生産は種子の分散（種子散布）によってその分布域を拡げ、種の生存においても重要な役割を果たす²³⁾。

種子散布には、種子が地面に到達するまでの間に遠くに輸送されるプロセス（フェーズ1）と地面に到達した後に地面上を転がるプロセス（フェーズ2）の2つのフェーズがあり²⁴⁾、海草においては、種子が底泥上で輸送されるメカニズムがフェーズ2にあたるのに対し、種子が浮遊して散布するメカニズムがフェーズ1にあたる²⁵⁾。アマモの種子散布研究は、いくつかの報告がある。アマモ種子散布のフェーズ1は、数十 km オーダーの長距

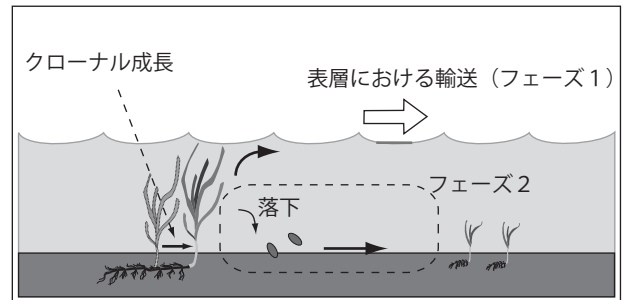


図-1 種子の生産およびその発芽による成長（再生産）と一つの個体が分枝や地下茎の延伸によって平面的に拡がる成長（クローナル成長）の模式図

離散布の存在が示唆されている^{25),26),27)}。そのメカニズムとしては、種子が生殖株や穂の集合体などの親株のコンポーネントに付着したまま浮遊し、そのコンポーネントの長い浮力維持時間が、種子を長距離に散布させると推測されている（Chesapeake Bay では、種子が生殖株とともに2から3週間浮遊して34 km 先まで散布されると推定された²⁵⁾；Swedish west coast では、種子が穂の集合体とともに少なくとも26日間浮遊して150 km 先まで散布されると推定された²⁶⁾；Wadden Sea では、種子が生殖株とともに130 km 先まで散布されると推定された²⁷⁾）。一方で、底面上に落下した種子は、流れによって数 m しか輸送されず²⁸⁾、散布距離はフェーズ1と比べると極端に短い。これらの散布メカニズムの他に、種子が穂から離脱する際に、気泡とともに浮遊することが報告されているが、その浮遊範囲は高々200 m であり²⁹⁾、散布距離はフェーズ2に近い。このように、アマモにおいては、散布メカニズムの違いが種子の拡散範囲に大きく影響する。

1.3. 研究の動機と着眼点

アマモの成長や生存には、光（水深）、水温、塩分、物理的攪乱の強度、などの要因が影響する^{30),31),32),33),34)}。これら要因が複合的に重なり合うことで、アマモ場の成立の有無が決まる。

しかしながら、例えば、アマモが生存して成長するための条件が整っていたとしても、再生産や分枝・地下茎の延伸による分布域の拡大、もしくは人為的な移植などによる個体の加入がなければ新たなアマモ場が拡大することはない。

前述したアマモ場の自律的回復の事例から理解できるように、消失したアマモ場はきっかけさえあれば、その

自らが有する能力によって驚くべき速度で回復する。しかしながら、現状のアマモ場回復は、移植のみに着目した技術によって取り組まれがちであり^{8),9),10),11),12),13)}、自律的回復能力を考慮しているとは言い難い。これは、自律的回復のメカニズムおよびその量的な理解が未だに進んでいないことが、原因であると考えられる。

海草においては、分枝や地下茎の延伸によって平面的に広がる成長に関する研究は、比較的進んでいる^{18),19),20),21)}。一方、種子がどのようなメカニズムで広がるのか、生産された種子量がどこにどれくらい到着しているのか、などの情報はほとんど分かっていない。

本研究においては、はじめに、我が国における藻場回復の事例を取り上げながら、湾スケールでの藻場回復において、再生産がどのように重要性を有しているのか検証する。次に、現地調査によって、種子散布メカニズム・生産種子量と散布種子量の把握を行い、種子の行方を推定する。これらの結果を踏まえて、アマモの自律的回復能力に基づいた藻場回復の取り組みの方向について考察を行う。なお、本論文においては、極力、専門用語の使用を避けた。やむなく登場する専門用語については、付録Aで説明しているのので、そちらを参照されたい。また、図中では英文表記を用いているが、こちらについても同様である。

2. 湾スケールでのアマモ場の拡がり

2.1. はじめに

海草藻場は、世界的に加速度的な減少傾向にあり⁷⁾、我が国の藻場も同様に全国的に減少傾向にある¹⁾。これらの減少傾向はすべての場所で同時に起きているわけではなく、増加と減少の正味の傾向として示されている⁷⁾。例えば、東京湾に位置する富津干潟沖の藻場においては、その面積は1986年以降に減少傾向にあったが³⁵⁾、2005年から2006年にかけて大きく増加している³⁶⁾。

本章では、増加傾向にあるアマモ場の面積増加速度を推定し、それと地下茎の延伸による藻場拡大速度とを比較する。この結果より、分枝・地下茎の延伸による成長がどの程度藻場拡大に寄与し、種子散布の重要性について考察する。

2.2. 材料と方法

(1) 藻場面積の拡がり

三河湾竹島周辺 (34°49'N, 137°14'E, 愛知県蒲郡市)

と久里浜湾 (35°13'N, 139°43'E, 神奈川県横須賀市) に分布するアマモ場を対象とし、アマモ場面積の経年変化を調査した。

竹島周辺のアマモ場において、2006年11月と2008年5月に被度の測定を行った。被度は、アマモ場が海底面を覆う割合を0から100% (およそ10%刻み) で数値化し、熟練したダイバーによって水面からの目視によって測定した。2008年5月においては、被度測定に加えて、アマモ場を概ね包含する格子状の測点を25地点設け、50cmの方形枠を用いて実生株 (種子から発芽して間もない個体) の密度を測定した (1地点あたりn=3)。これら測点のうち、アマモが2006年11月において最も密に生育していた場所を基準点Aとして設定した。また、各測点においては、サンプリング時に水深と時刻を計測した。なお、実生株は、底泥から丁寧に掘り起こし、いくつかの側方枝を有していても1つの個体として識別できるものを1株とした。

久里浜湾のアマモ場については、現地調査 (2010年) および空中写真 (1983年, 1988年, 2000年, 2007年) によって分布域を判別した。現地調査においては、岸沖方向に数本のラインを設け、そのライン上をGPSを読みながら船で走行し、アマモが分布する境界を船上からの目視観察によって判別した。また、別途、岸沖方向の水深変化を時刻とともに計測した。空中写真については、デジタル画像 (焼印画については、スキャンしてデジタル化した画像) をオルソ化した。アマモ場分布は、すでに解析済みの年のアマモ場分布を参考として、判別した (2010年のアマモ場分布は、現地調査による目視によって得られたものであり、確度が高いと考え、これを基に他の年の分布を判別した)。

アマモ場の拡がり速度と地下茎の延伸速度を比較するため、三河湾と小田和湾 (35°13'N, 139°37'E, 神奈川県横須賀市) においてアマモを地下茎ごと採取し (それぞれ、2007年7月と2008年7月に採取)、実験室において地下茎の節間の長さを測定した。

(2) データ解析

三河湾と久里浜湾の現地調査によって得られた水深データと時刻データより、アマモ分布の水深帯を基本水準面 (C.D.L) からの深さとして求めた。

久里浜湾のアマモ場の判別は、透明度が悪い時に撮影された空中写真を用いることもあり、深さ方向の判別精度が年によって異なる。よって、分布域を沿岸方向の長

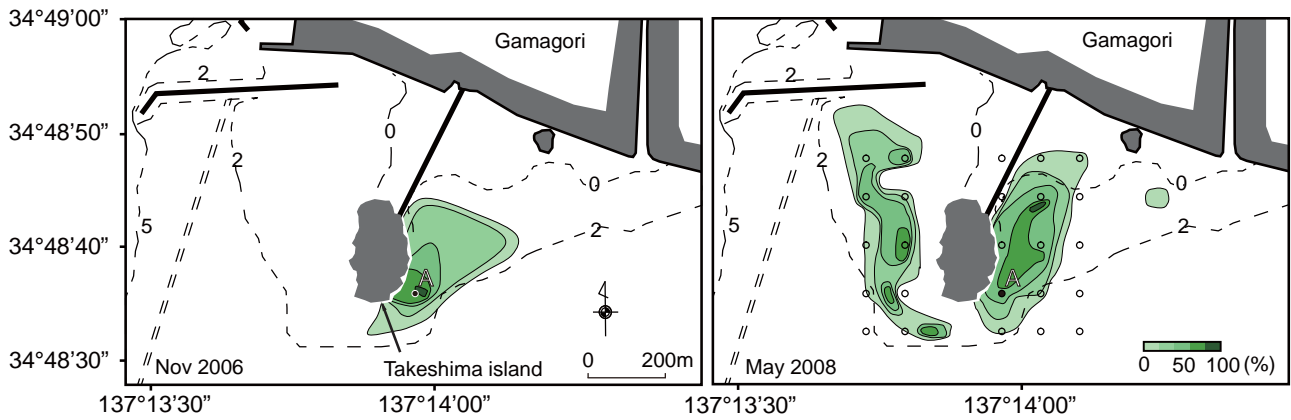


図-2.1(a) 三河湾竹島（愛知県蒲郡市）周辺のアマモ場の分布変化. 2008年の図に示された丸は、格子状調査点を示し、竹島南東側にある黒点は、2006年において、アマモが最も密に分布していた場所（基準点A）である.



図-2.1(b) 久里浜湾のアマモ場の変化. 白枠は、2010年1月における現地観測（船上からの目視）によって、判別したアマモ場. 緑枠は2007年（4月から5月のうち）、赤枠は2000年（時期は不明）、ハッチは1988年（10月から12月のうち）、に撮影された空中写真から判別したアマモ場. 1983年においては、アマモ場は確認できなかった. 青色のドットは、2010年1月において岸沖方向に水深を計測した点を示している.

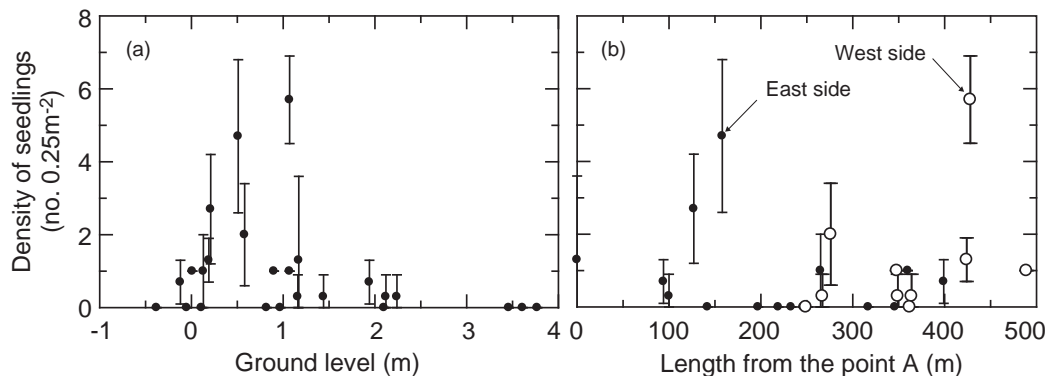


図-2.2 三河湾竹島（愛知県蒲郡市）における2008年5月のアマモ実生株の分布。(a)水深帯（基本水準面からの深さ）と実生株密度との関係、(b)2006年11月にアマモが密に生育していた場所（基準点A）からの距離と実生株密度との関係。エラーバーはSDを示している。

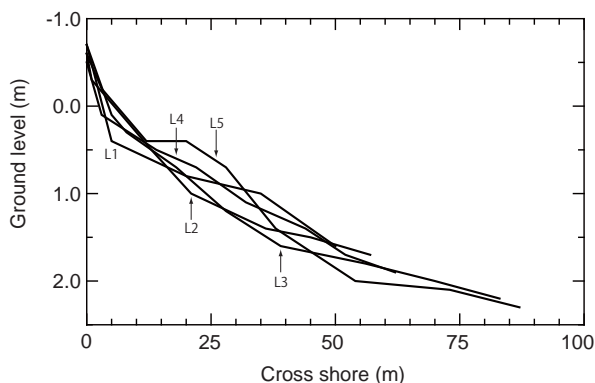


図-2.3 久里浜湾のアマモ場分布域における地形。

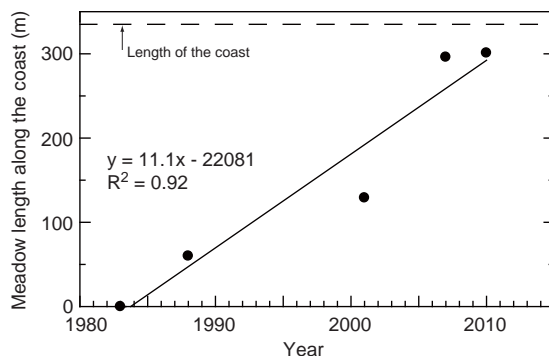


図-2.4 久里浜湾におけるアマモ場の沿岸方向幅の経年変化 ($p < 0.01$)。

さで評価した。これらの解析には、GISソフト（ArcGIS Desktop 9.3.1）を用いた。沿岸方向の分布長さと同対象年の関係については、年々の拡大速度が一樣と仮定した上で直線回帰した。

地下茎の延伸速度については、調査によって得られた節間長に葉間期（1つの節が形成される日数）を乗じることで、1年あたりの概算値を求めた。なお、葉間期は、研究所のメソコスムにおいて14.3日³⁷⁾、三河湾において15日³⁸⁾、海外の文献値が15.3日²²⁾であることから、概ねの平均値である15日を採用した。

2.3. 結果

アマモの分布は、三河湾と久里浜湾において、拡大傾向が見られた（図-2.1(a),(b)）。2008年5月における三河湾のアマモ実生株は、おおよそC.D.L ± 0 mからC.D.L+1.5 mの深さに分布しており（図-2.2(a)）、2006年11月に高密度でアマモが分布していた基準点A点からおおよそ500 m離れたところまで分布していた（図

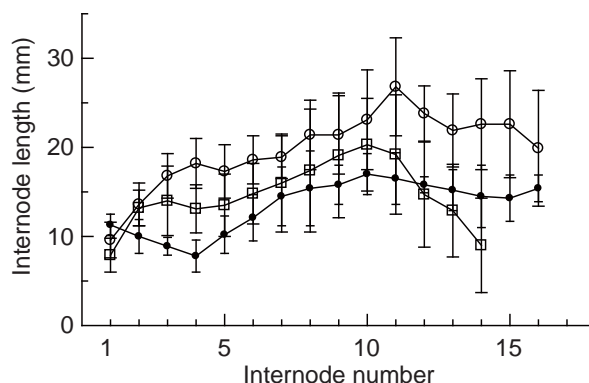


図-2.5 アマモの地下茎節間長。四角は三河湾、丸は小田和湾（中抜はC.D.L+0.5、黒塗はC.D.L+3.5）。

-2.2(b)）。久里浜湾のアマモ場の水深帯は、沿岸方向に一樣であり（図-2.3）、アマモも沿岸方向に一樣に分布していた（図-2.1(b)）。2010年におけるアマモ場分布域は、おおよそC.D.L+0.4 mからC.D.L+1.6 mの深さであった。アマモ分布域は、1983年の空中写真においては確認で

きなかったが、2010年までの間に沿岸方向に300 m程度まで拡大した(図-2.4, $p < 0.01$, 11 m yr^{-1})。

アマモの地下茎の節間長は、およそ8 mmから27 mmであった(図-2.5)。これより、1983年から2010年の間に地下茎の延伸によって拡大した藻場の範囲は、最大でも18 m程度(0.65 m yr^{-1})と見積もられた。

2.4. 考察

三河湾と久里浜湾のアマモ場における分布域の拡大速度は、地下茎の延伸速度より10倍以上大きく、これらのアマモ場の拡大は地下茎延伸のみでは説明できない。富津干潟沖や伊勢湾の藻場でも拡大もしくは移動が観測され、地下茎の延伸による成長では説明できないオーダーであった^{36),39)}。地下茎の延伸による成長によって数haに拡大したアマモ場も報告されているが、これは1000年以上もの長い時間をかけた結果であり⁴⁰⁾、三河湾と久里浜湾における数年もしくは数十年レベルでの分布域拡大とは時間オーダーが全く異なる。一方、アマモの種子は一度の散布で百km以上拡がることもあり^{25),26),27)}、地下茎の延伸による成長よりもはるかに大きな分布域拡大ポテンシャルを有している。これらより、三河湾や久里浜湾で見られた数百メートルの藻場拡大においては、種子散布が強く寄与したと考えられる。

三河湾におけるアマモ場は、1年半で500 m程度の拡大が見られた。これは、伊勢湾(三河湾も含む)における既往の報告³⁹⁾と同じオーダーの結果である。一方、久里浜湾における拡大速度は、これらよりも1オーダー低い拡大速度であった。ここでは、毎年同じ拡大速度と仮定した上で、27年間の平均的な値を一次近似によって推定しているため、例えば、短い時間スケールでもっと大きな拡大速度があったとしても、ここではそれは検出できない。

三河湾と久里浜湾の拡大後のアマモ分布域は、水深に強く依存しており、久里浜湾では沿岸方向にほぼ一様な帯状分布、三河湾では竹島周辺の地形に沿った分布を示した。分布域の水深依存はおそらく光量が原因であり^{30),31)}、種子が行き着いた先では、発芽・生長のための環境条件が整っていることがアマモ場拡大の前提条件となる。

2.5. 結論

地下茎の延伸による成長のみでは、三河湾と久里浜湾におけるアマモ場の分布域拡大を説明することはできな

い。すなわち、もう一つのアマモの成長パターンである種子の生産とその発芽が、これら2つのアマモ場の拡大に強く寄与していたものと推測される。

3. 種子はどこに行くか?

3.1. はじめに

三河湾と久里浜湾のアマモ場において23年間で300 m程度の自律的回復が見られ、種子散布の重要性が示唆された。しかしながら、アマモの種子散布はどのようなメカニズムで起きているのかについては、未だ不明である。

アマモ場分布域拡大のポテンシャルを知るためには、生産される種子量と種子の主要な散布プロセスがフェーズ1とフェーズ2のどちらなのかを明らかにする必要がある。生産される種子量については、比較的容易に得られる情報であり、生殖株が持つ穂の数や穂に含まれる種子数から計算される^{32),41)}。一方で、フェーズ1とフェーズ2のどちらが主要な種子散布メカニズムなのかについては研究されていない。

種子の比重は海水よりも重たいため(比重1.1-1.2, 付録B)、親株のコンポーネント(穂, 穂の集合体, 生殖株)に着いている状態がその浮遊(フェーズ1)の要因となる。本研究では、種子が親株のどのコンポーネントに着いて散布されるのか、また、それらのコンポーネントが浮くか沈むか、に着目した調査および実験を行い、アマモの種子散布において、フェーズ1とフェーズ2のどちらが支配的かについて検討を行う。

3.2. 材料と方法

(1) 調査場所と時期

調査は、藻場拡大が観測された久里浜湾において行った。本州のアマモの果実と種子の形成時期がおおよそ4月から8月であることから^{32),42)}、おおよそ1回の間隔で5月から8月までに調査した。

(2) 種子散布のフェーズ

a) 生殖株のモジュール構造

帯状に分布するアマモ場を沿岸方向に一様と仮定し、生殖株をランダムに20個体をサンプリングした。サンプリングは、生殖株のモジュール構造が崩れないよう、丁寧に行った。サンプルした生殖株は、実験室へ持ち帰り、花および種子を含む穂の数を計数した。また、脱落した穂とその集合体の痕跡から計数した。また、生産された

種子量を推定するため、生殖株に含まれる果実および種子の数、穂あたりの果実および種子数、穂の集合体あたりの穂の数を計数した。

b) 穂と穂の集合体の浮き沈み

6月と7月の調査で得られた生殖株から、穂の集合体と穂を手でちぎりとり、海水に投入して浮き沈み試験した。7月に試験したサンプルについては、現場から実験室への搬送中にいくつかの穂が脱落していた。これらを脱落穂として分類し、浮き沈み試験した。試験に用いた海水の水温と塩分は多項目水質計 (U-21, HORIBA) により測定した。

7月においては、さらに、久里浜湾の現地において追加の浮き沈み試験を行った。アマモ場からランダムに 10 shoots のサンプルを採取し、一つ一つの生殖株をリターバッグに入れて、海域の条件下 (波高およそ 5 cm, 周期およそ 3 s) に 10 s 間曝した (穂の脱落試験) 後、生殖株から脱落した穂を得た。生殖株についてそのままの穂は、生殖株から手でちぎりとった。前者を脱落穂とし、後者と分類した。これらすべての穂について、浮き沈み試験した。また、果実および種子の数を計数した。試験に用いた海水の水温と塩分は多項目水質計により測定した。

c) 種子の散布状態

海岸汀線際において 10 m の区画を 3 区画設け、打ち上がっているコンポーネント (穂、穂の集合体、生殖株) を採取した。穂の集合体と生殖株においては、それらに含まれる穂の数を計数した。穂のタイプを、種子もしくは果実を含んでいるもの、花序のもの、何も無いもの (脱落後もしくは未結実)、に分類した。

(3) 種子の行き先

a) 生産された種子量の推定

生産された種子量を推定するため、生殖株あたりのポテンシャル種子量を式 (1)、面積あたりのポテンシャル種子量を式 (2) によって推定した。

$$\begin{aligned} \text{ポテンシャル種子量 shoot}^{-1} = & (\text{果実数} + \text{種子数}) \text{ shoot}^{-1} \\ & + \text{痕跡 spathes 数 shoot}^{-1} \times (\text{果実数} + \text{種子数}) \text{ spathe}^{-1} \\ & + \text{痕跡 rhipidia 数 shoot}^{-1} \times \text{spathes rhipidium}^{-1} \times (\text{果実数} \\ & + \text{種子数}) \text{ spathe}^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ポテンシャル種子量 m}^{-2} = & \\ \text{ポテンシャル種子量 shoot}^{-1} \times \text{reproductive shoot m}^{-2} & (2) \end{aligned}$$

生殖株の密度については、2010年3月に久里浜湾の密度を測定し、それに全株密度に対する生殖株の割合を

10%から15%と仮定して (メソコスム水槽に生育するアマモで2004年に15.2%, 2006年に10.6%) 乗じることで求めた。

b) パッチ内外における種子の分布密度

種子散布後の種子の定着場所をアマモ場のパッチ内 (アマモの株がある程度密に集合している場所) とギャップ (ある程度の空間でアマモの株が確認できない場所) において、株密度および種子密度を測定した。パッチ内とギャップのそれぞれにおいて、ランダムに 12 点を選び、園芸用スコップ (長さ 23.5 cm, 幅 13 cm, 面積 305.5 cm²) を用いて底泥を採取し、それを 1 mm 目の篩にかけて、篩に残った種子と実生の数を計数した。ただし、種皮 (種子の外皮) だけが残っている場合も計数し、解析に用いた。ここに、調査は、久里浜のアマモは12月には十分に発芽しているものと判断したため (付録 C),

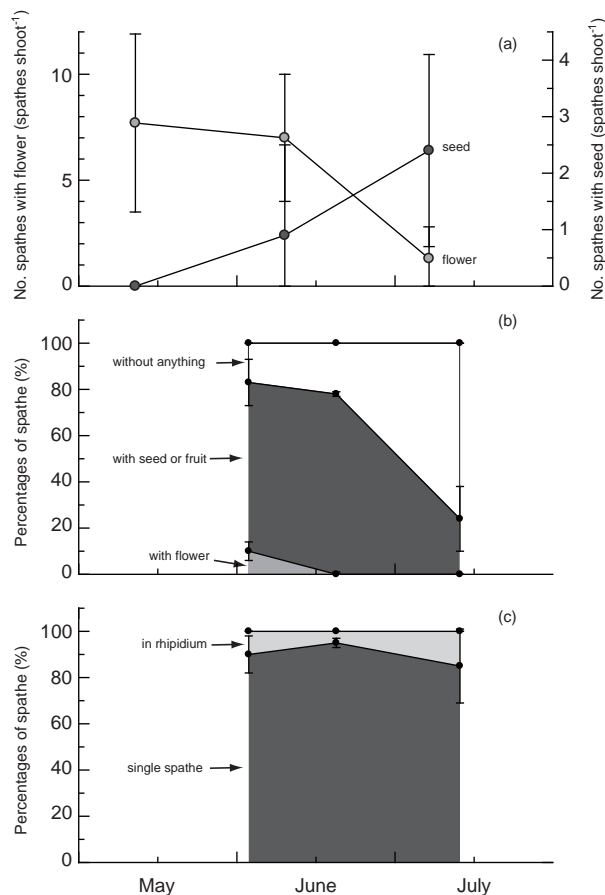


図-3.1 穂のタイプの変化. (a) 生殖株が有する花の穂および種子を有する穂の数 (n=20), (b) 久里浜海岸 10 m 区画に打ち上がっていた穂のタイプの存在割合 (n=3), (c) すべての穂のうち、単体の割合、集合体として存在していた割合、生殖株に含まれていた割合 (n=3), を示す。エラーバーは SD を示す。

2010年1月にSCUBAによって行った。

(4) 統計解析

生殖株あたりの花の穂数と種子を含んだ穂数の月変化を、ANOVA with TukeyHSDで解析した。

生産された生殖株あたりの穂数および穂の集合体数を調べるため、穂数+その痕跡数および穂の集合体数+その痕跡数の月間の差をANOVA with TukeyHSDで解析した。また、生殖株あたりの花の穂数と種子を含んだ穂数の月間変化を調べるため、同様に、ANOVA with TukeyHSDで解析した。

浮き沈み試験結果は、すべての穂、種子を含む穂、脱落試験によって脱落した穂に分類して整理した。それぞれにおいて、生殖株ごとに浮いた穂の数と沈んだ穂の数の差をWilcoxon順位和検定により対比較した。また、7月の室内試験用の搬送時に脱落した穂と現地における追加試験で脱落した穂について、浮いたものと沈んだものに分け、果実数および種子数 (fruits & seeds spathe⁻¹, seeds spathe⁻¹) の差をMann-WhitneyのU検定で比較した。

藻場内外における種子の分布密度の差は、t検定により検定した。

3.3. 結果

(1) 穂の形成と散布時期

生殖株は、5月から7月にかけては観測されたが、8月にはなくなっていた。花つきの穂は、5、6月より7月において有意に少なく(図-3.1(a); $p < 0.001$)、種子つきの穂は、7月に有意に多かった ($p < 0.001$)。海岸汀線に打ち上がっていた穂は、6月と7月以降、花つきものはほとんど確認されず、種子つきもしくはカラのもの

なった(図-3.1(b))。

海岸汀線に打ち上がっていた生殖株のモジュールとしては、株そのものはなかった(表-3.1)。打ち上がっていた穂は、ほとんどが単体の穂として打ち上がっていた(図-3.1(c))。8月には、これらすべてがなかった。

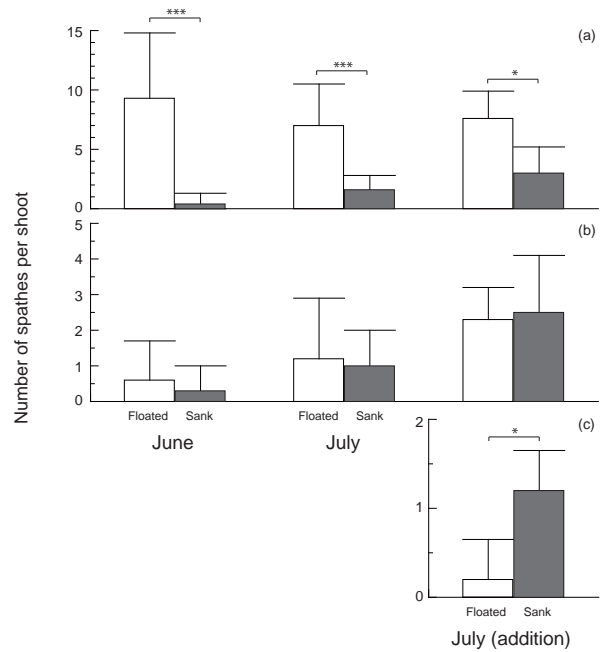


図-3.2 浮沈試験の結果。(a) 試験に用いたすべての穂の浮沈比較 (n=20 in June and July, n=10 in July-addition), (b) 種子を含んでいる穂のみの浮沈比較 (n=20 in June and July, n=10 in July-addition), (c) 脱落した穂のみについての浮沈比較 (n=5)。試験は海水を用いて行った (June, temp=20.5°C, density=22; July, temp=24.2-24.7°C, density=21-22; July addition, temp=22.7°C, density=22)。エラーバーはSDを示している。検定には、Wilcoxon符号化順位検定を用いた (*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$)。

表-3.1 久里浜湾における海岸汀線際に打ち上がっていた生殖株のコンポーネントの内訳。10m区画中の穂の数 (Average ± SD, n=3) を示している。n.d. は未検出を意味している

Date	Number of single spathes	rhpidia	reproductive shoots
090602	42.3±21.7	2.7±2.1	n.d.
090619	141.0±54.1	2.7±1.5	n.d.
090713	37.0±45.9	7.7±11.6	n.d.
090807	n.d.	n.d.	n.d.

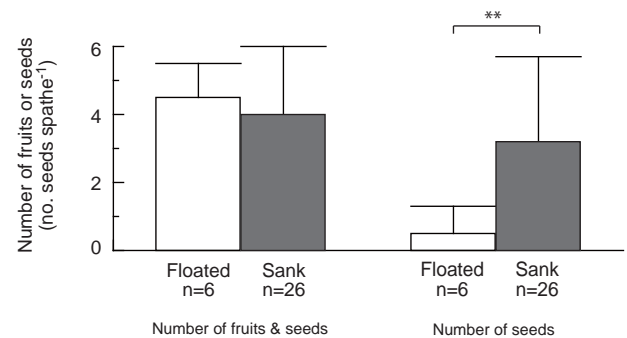


図-3.3 脱落した穂が有する種子数の比較。エラーバーはSDを示している。検定には、Mann-WhitneyのU検定を用いた (**, $p < 0.01$)。

表-3.2 久里浜湾におけるアマモの生殖株に含まれる穂および穂の集合体の数と痕跡の数 (Average ± SD, n=20) を示している。8月に生殖株が無くなっていた。なお、表中には、三河湾のアマモについての結果も示している。

Date	Spathe			Rhipidum		
	No. spathes (in rhipidia)	No. vestiges	No. spathes+vestiges	No. rhipidia	No. vestiges	No. rhipidia+vestiges
Kurihama Bay						
090511	13.5±6.6 (9.3±6.3)	0.1±0.2	13.5±6.7	2.5±1.5	0.0±0.0	2.5±1.5
090609	22.4±8.3 (16.7±7.8)	2.0±3.2	24.4±9.2	3.4±1.2	0.4±0.6	3.8±1.1
090707	15.4±5.6 (11.5±5.4)	7.0±4.4	22.4±7.9	3.5±1.6	0.1±0.3	3.6±1.6
090807	-	-	-	-	-	-
Mikawa Bay						
090608	22.0±7.4 (17.7±7.0)	0.2±0.5	22.2±7.5	3.9±1.3	0.0±0.0	3.9±1.3
090709	12.6±4.0 (9.8±3.9)	6.4±5.3	19.0±5.9	3.8±0.9	0.0±0.0	3.8±0.9

表-3.3 ポテンシャル種子量とその内訳。なお、表中には、三河湾のアマモについての結果も示している。

Date	Fruits + seeds per shoot	Spathes per rhipidium	Fruits+seeds per spathe	Total fruits + seeds per shoot
Kurihama Bay				
090511	20.6±25.5	3.8±1.6	8.5±3.0	21.0±25.7
090609	53.1±40.5	5.4±1.8	5.5±2.4	74.4±50.6
090707	30.8±18.0	4.9±1.2	3.6±2.2	57.7±26.8
Mikawa Bay				
090608	46.7±45.3	4.6±1.9	5.9±2.7	47.6±47.0
090709	1.0±1.5	3.8±1.5	1.5±0.7	11.9±9.1

(2) 穂と穂の集合体の浮き沈み

穂(実と種子を含むもの)は、浮くものの方が沈むものより多かったが(図-3.2(a)), 種子を含んだ穂のみについてみると差は見られなかった(図-3.2(b)). しかし、脱落穂においては、沈むものの方が有意に多かった(図-3.2(c)).

7月にサンプリングし、搬送中に脱落した穂数は、26

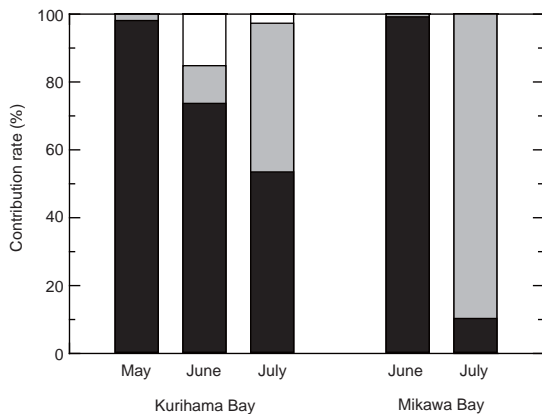


図-3.4 ポテンシャル種子数に対する計数値と推定値の割合。黒色は生殖株が有していた果実および種子の計数数の割合、灰色は脱落穂の数、白色は脱落した穂の集合体から推定した数の割合。なお、図中には、三河湾における結果も示している。

spathesであった。その内、一つは実も種も持たない spathe だった。現地での脱落試験では、7つの脱落穂が得られた。計32の実もしくは種子を含んだ穂の内、6 spathes が浮き、26 spathes が沈んだ。これらの穂が含む種子数は、沈んだ穂の方が有意に多かった(図-3.3).

穂の集合体は、6月においては、 3.3 ± 1.2 rhipidia shoot⁻¹ が浮いて 0.1 ± 0.3 rhipidia shoot⁻¹ が沈み、7月においては、 3.2 ± 1.4 rhipidia shoot⁻¹ が浮いて 0.3 ± 0.6 rhipidia shoot⁻¹ が沈んだ。また、7月サンプリングの搬送中と現場脱落試験において脱落する穂の集合体はなかった。

(3) 種子の形成量とパッチ内への残存量

穂数+その痕跡数は、6月と7月において5月よりも有意に多かった(表-3.2; $p < 0.001$, 5月と6月の比較; $p < 0.01$, 5月と7月の比較)。7月においては、痕跡が増加し ($p < 0.001$, 7月に対する5月と6月の比較), 現存する穂の数は7月よりも6月の方が多かった ($p < 0.01$). 穂の集合体については、穂の集合体数+その痕跡数で5月と6月に有意な差が見られたが ($p < 0.05$), 6月と7月は差が見られなかった。穂の集合体の痕跡は、すべて

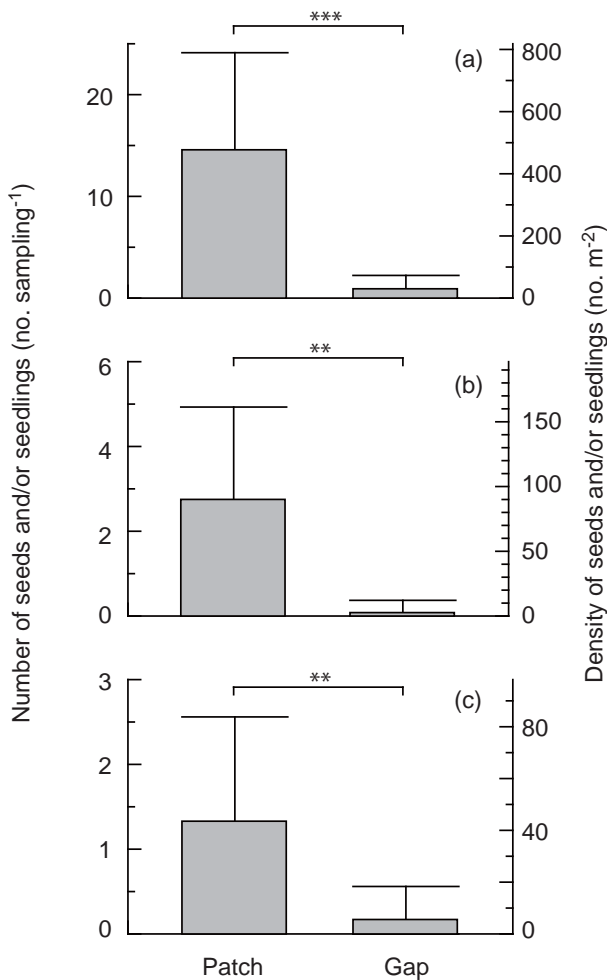


図-3.5 アマモ場内外における種子数の比較。(a) 種子、実生、種子の種皮の数、(b) 種子数、(c) 実生の数。エラーバーはSDを示している。比較の検定には、t検定を用いた(**, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$)。

の期間においてほとんどなかった。

ポテンシャル種子量は、21.0から74.4個と推定された(表-3.3)。6月以降は、痕跡の数も多いことから、推定量の割合が大きくなった(図-3.4)。アマモのシュート密度は 121.6 ± 61.3 shoots m^{-2} であった。これより、生殖株は12から18 shoots m^{-2} と推定された。これらに6月のポテンシャル種子量の平均値を乗じると、893から1339 seeds m^{-2} の種子が生産されていたと推定された。

種子は、ギャップよりもパッチ(株の密度は 80.0 ± 49.0 shoots m^{-2})内に多くトラップされていた(図-3.5(a), $p < 0.001$)。その密度は、477 seeds m^{-2} であり、生産されたポテンシャル種子量のおよそ1/2から1/3であった。種子のみ(図-3.5(b), $p < 0.01$)、実生のみ(図-3.5(c), $p < 0.01$)、についても同様にパッチ内の方が多かった。

3.4. 考察

久里浜湾におけるアマモの種子は、少なくとも1/2から1/3がその場に落下していた。パッチ内における種子量は、種子散布後(8月)から5カ月経過した時点のものであったことから、パッチ内に落下した種子量はそれ以上に多くあったと予想される。すなわち、アマモの種子散布においては、フェーズ2が量的に多くを占めていると考えられる。

海岸の汀線際に打ちあがっていた種子は、ほとんどが穂に含まれた状態であった。痕跡結果からも、穂の集合体よりも穂の方が種子散布の状態として機能していたことが強く示唆される。この穂の浮き沈みについては、穂の成熟状態(果実のみしかない、もしくは脱落しやすい状態)と種子量に強く影響していた。これは、組織老化による浮力消失と種子の高い比重(1.1から1.2, 付録B)のコンビネーションによる結果であると考えられる。一方で、穂は、未成熟の状態(果実を多く含むもの)では浮くものが多かった。これは、もし高波浪などによって穂が未成熟の状態で飛ばされれば、フェーズ1が量として多くなる可能性があることを示している。果実もしくは種子を含む穂の発芽率は数%であり(付録C)、未成熟の状態でも穂が切り離されても、その種子散布の効果^{25),26),27)}は十分にあり、フェーズ1として種の分布域拡大に貢献する可能性がある。

生産された種子量については痕跡から推定しているものの、デンマークのLimfjordenにおける種子量(73.1 ± 11.7 seeds shoot⁻¹,⁴³⁾)とほぼ同じ量である。一方で、ポテンシャル生産種子量の面積当たりの比較では、Limfjordenの方(8100 seeds m^{-2})が久里浜湾よりも8倍程度多い⁴³⁾。これは生殖株の密度の差に起因している。ポテンシャル種子量は、場所間もしくは生態学的な特徴の違い(多年生よりも1年生の方が生殖株に変化する割合が高く、多くの種子を作る)によって大きく変動することから⁴³⁾、久里浜湾とLimfjordenで大きな差が生じたものと考えられる。

パッチ内における種子は、散布から5ヶ月経過しても、1/2から1/3程度も残存していた。すべての種子がその場に落下していたとしてもその半分程度がパッチ内に留まっていたことになる。久里浜湾における流動に関する検討は行っていないものの、10月8日に大型の台風18号が襲来したこと⁴⁴⁾から、掃流力が底面上の粒子(種子)を輸送する程度にいたらなかったと推測するよりも、親株の地下部や生物の巣穴などによって種子がトラップさ

れ（抵抗力の増大）、それがパッチ内への残存効果を高めていた可能性が高いと推測する²⁸⁾。

3.5. 結論

アマモの種子は、穂に含まれる状態で散布される可能性が高い。その浮き沈みは、種子量と成熟度によって主にコントロールされていると推測される。

久里浜湾における種子は、ほとんどがその場に落下していた。この結果より、散布される種子のほとんどは、海底面を掃流されるフェーズ2によって輸送されることが強く示唆された。

4. 総合結論

久里浜湾と三河湾におけるアマモ場の分布域拡大においては、種子の生産とその発芽が強く寄与していたものと推測された。

アマモの種子は、ほとんどがその場に落下していたことより、アマモ場分布域の拡大を計画する上では、アマモ場内における底泥上の種子輸送を把握することが効果的であると結論付けられる。

5. おわりに

本研究では、アマモの種子散布プロセスは、種子の成熟度によって変化することを示唆した。すなわち、種子が未成熟の時期に波浪が襲来して穂とともに脱落すれば、水面を漂いながら遠くに散布される可能性があり、海域の静穏が保たれたまま成熟すれば、種子はその場へ落下して既存藻場の個体数増加に寄与する。これは、藻場回復を計画している場所において、アマモ再生産の時期の波・流れの物理特性を把握することが、その場の藻場の種子散布プロセスを推定する上で重要となる。例えば、自律的な藻場回復を目指す場合、種子がその場へ落下して底質輸送として周辺に分散されることを想定して場所選定をすれば、効果的に自律回復能力を引き出せる可能性が高い。また、藻場が成立する条件が整っているものの現存していない場所においては、周辺の既存藻場からの種子供給ができない物理構造になっているためであろう。偶然の種子到着や移植などのきっかけさえあれば、後は種子散布によって自律的に分布域拡大する可能性がある。

再生産による分布域拡大の戦略は大型の海草に見ら

れる傾向であり⁴⁵⁾、久里浜湾と三河湾におけるアマモは、大型海草としての挙動を示した。しかしながら、小型の海草は地下茎の延伸による成長の戦略をとり⁴⁵⁾、*Halodule wrightii* のような小さい種の海草はギャップを地下茎の延伸によって埋める⁴⁶⁾。我が国の小型海草としては、コアマモやウミヒルモが想定され、これらの回復や保全を考える場合、必ずしも種子散布に着目しなければならないというわけではない。その場合は、対象種ごとに種子散布の重要性の検討を行い、そのメカニズムを解明することが重要となる。

(2010年4月26日受付)

謝辞

本研究では、現地や実験室での種子計数といった緻密で多大な労力を要した。斎藤愛美氏（就学生職員）には、これらの作業においてご尽力いただき、また、イラスト作成においてもご協力いただいた。渡辺健太郎氏（前千葉大学仲岡研究室）と山北剛久氏（森林総合研究所、前千葉大学仲岡研究室）からは、GISへの導入において基礎的なことから丁寧にアドバイスをいただいた。さらに研究内容においても有益な意見をいただいた。伴野雅之氏（沿岸土砂管理研究チーム研究官）には、現地調査においてご協力いただいた。鶴崎賢一氏（群馬大学准教授、前沿岸土砂管理研究チーム研究官）には、種子輸送のポテンシャルについて有益な意見をいただいた。所内の方々からは、部内討議および勉強会を通じて、様々な角度からの意見をいただいた。また、公表審査会の方々、特に中村由行氏（研究主監）からは、本報告のまとめにおいて、ご指導いただいた。ここに感謝の意を表す。

本研究は、関東地方整備局横浜空港技術調査事務所からの受託研究費「港湾における二酸化炭素削減方策評価のための実験手法の検討及び数値解析：港湾施設の高度化に関する研究」（平成21年度一）および研究所の特別研究費「沿岸生態系によるCO₂吸収量の強化に関する調査および実験」（平成21年度一）の一部として行われた。

参考文献

- 1) 環境庁(1994) 海域生物環境調査報告書(干潟,藻場,サンゴ礁調査)第2巻藻場,第4回自然環境保全基礎調査, <http://www.biodic.go.jp/reports/4-12/r00a.html>
- 2) Heck Jr, K. L. & Thoman, T. A. (1984) The nursery role of seagrass meadows in the upper and lower reaches of the

- Chesapeake Bay. *Estuaries*, 7, 70-92.
- 3) Heck Jr, K. L., Hays, G. & Orth, R. J. (2003) Critical evaluation of the nursery role hypothesis for seagrass meadows. *Marine Ecology Progress Series*, 253, 123-136.
 - 4) Shoji, J., Sakiyama, K., Hori, M., Yoshida, G. & Hamaguchi, M. (2007) Seagrass habitat reduces vulnerability of red sea bream *Pagrus major* juveniles to piscivorous fish predator. *Fisheries Science*, 73, 1281-1285.
 - 5) Hoshika, A., Sarker, M. J., Ishida, S., Mishima, Y. & Takai, N. (2006) Food web analysis of an eelgrass (*Zostera marina* L.) meadow and neighbouring sites in Mitsukuchi Bay (Seto Inland Sea, Japan) using carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Aquatic Botany*, 85, 191-197.
 - 6) Orth, R. J., Carruthers, T. J. B., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Heck JR, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Olyarnik, S., Short, F. T., Waycott, M. & Williams, S. L. (2006) A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*, 56, 987-996.
 - 7) Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J. B., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck Jr, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Short, F. T. & Williams, S. L. (2009) Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 12377-12381.
 - 8) 伊豫田紀子・島谷学・岩本裕之 (2005) アマモの種子の流出を抑制する播種材料について, 海洋開発論文集第 21 巻, p683-688.
 - 9) 高山百合子・上野成三・湯浅城之・前川行幸 (2005) 播種・株植が不要なアマモ移植方法における移植マットの改良とアマモ定着効果, 海岸工学論文集第 52 巻, p1216-1220.
 - 10) 山本克則・新保裕美・田中昌宏・三富龍一・小河久朗 (2006) アマモ場拡大の実態把握と種苗移植による新規群落形成の試み, 海岸工学論文集第 53 巻, p1006-1010.
 - 11) 越川義功・山本克則・林文慶・中村華子・田中昌宏・小河久朗 (2006) アマモの安定種苗生産とその移植による群落形成, 海洋開発論文集第 22 巻, p625-630.
 - 12) 片倉徳男・Zeina Jokadar・勝井秀博・Shaun Lenehan・高山百合子・Millie Plowman (2008) 地下茎で群落を拡大する亜熱帯の海草を対象とした移植技術の開発, 海岸工学論文集第 55 巻, p1291-1295.
 - 13) 高山百合子・片倉徳男・上野成三・湯浅城之 (2008) 英虞湾における移植基盤を用いたコアモ移植方法の現地検討実験, 海岸工学論文集第 55 巻, p1266-1270.
 - 14) Seddon, S. (2004) Going with the flow: Facilitating seagrass rehabilitation. *Ecological Management and Restoration*, 5, 167-176.
 - 15) Plus, M., Deslous-Paoli, J. M. & Dagault, F. (2003) Seagrass (*Zostera marina* L.) bed recolonisation after anoxia-induced full mortality. *Aquatic Botany*, 77, 121-134.
 - 16) Lee, K. S., Park, J. I., Young, K. K., Sang, R. P. & Kim, J. H. (2007) Recolonization of *Zostera marina* following destruction caused by a red tide algal bloom: The role of new shoot recruitment from seed banks. *Marine Ecology Progress Series*, 342, 105-115.
 - 17) Greve, T. M., Krause-Jensen, D., Rasmussen, M. B. & Christensen, P. B. (2005) Means of rapid eelgrass (*Zostera marina* L.) recolonisation in former dieback areas. *Aquatic Botany*, 82, 143-156.
 - 18) Duarte, C. M. & Sand-Jensen, K. (1990) Seagrass colonization: patch formation and patch growth in *Cymodocea nodosa*. *Marine Ecology Progress Series*, 65, 193-200.
 - 19) de Kroon, H. & Schieving, F. (1991) Resource allocation patterns as a function of clonal morphology: a general model applied to a foraging clonal plant. *Journal of Ecology*, 79, 519-530.
 - 20) Marbà, N. & Duarte, C. M. (1998) Rhizome elongation and seagrass clonal growth. *Marine Ecology Progress Series*, 174, 269-280.
 - 21) Sintes, T., Marbà, N., Duarte, C. M. & Kendrick, G. A. (2005) Nonlinear processes in seagrass colonisation explained by simple clonal growth rules. *Oikos*, 108, 165-175.
 - 22) Hemminga, M.A. & Duarte, C.M. (2000) Seagrass architectural features. *Seagrass ecology*. Cambridge University Press, pp. 27-64.
 - 23) Howe, F. & Smallwood, J. (1982) Ecology of seed

- dispersal. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 13, 201-228.
- 24) Watkinson, A. R. (1978) The demography of a sand dune annual: *Vulpia fasciculata*. III. the dispersal of seeds. *Journal of Ecology*, 66, 483-498.
- 25) Harwell, M. C. & Orth, R. J. (2002) Long-distance dispersal potential in a marine macrophyte. *Ecology*, 83, 3319-3330.
- 26) Källström, B., Nyqvist, A., Åberg, P., Bodin, M. & André, C. (2008) Seed rafting as a dispersal strategy for eelgrass (*Zostera marina*). *Aquatic Botany*, 88, 148-153.
- 27) Erftemeijer, P. L. A., Van Beek, J. K. L., Ochieng, C. A., Jager, Z. & Los, H. J. (2008) Eelgrass seed dispersal via floating generative shoots in the Dutch Wadden Sea: A model approach. *Marine Ecology Progress Series*, 358, 115-124.
- 28) Orth, R. J., Luckenbach, M. & Moore, K. A. (1994) Seed dispersal in a marine macrophyte: Implications for colonization and restoration. *Ecology*, 75, 1927-1939.
- 29) Churchill, A. C., Nieves, G. & Brenowitz, A. H. (1985) Flotation and dispersal of eelgrass seeds by gas bubbles. *Estuaries*, 8, 352-354.
- 30) Dennison, W. C. & Alberte, R. S. (1985) Role of daily light period in the depth distribution of *Zostera marina* (eelgrass). *Marine Ecology Progress Series*, 25, 51-61.
- 31) Dennison, W. C. (1987) Effects of light on seagrass photosynthesis, growth and depth distribution. *Aquatic Botany*, 27, 15-26.
- 32) Nakaoka, M. & Aioi, K. (2001) Ecology of seagrasses *Zostera* spp. (Zosteraceae) in Japanese waters: a review. *Otsuchi Marine Science*, 26, 7-22.
- 33) Lee, K. S., Park, S. R. & Kim, Y. K. (2007) Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350, 144-175.
- 34) Nejrup, L. B. & Pedersen, M. F. (2008) Effects of salinity and water temperature on the ecological performance of *Zostera marina*. *Aquatic Botany*, 88, 239-246.
- 35) 山北剛久・仲岡雅裕・近藤昭彦・石井光廣・庄司泰雅 (2005) 東京湾富津干潟における海草藻場の長期空間動態, 保全生態学研究 10, p129-138.
- 36) Yamakita, T. & Nakaoka, M. (2009) Scale dependency in seagrass dynamics: How does the neighboring effect vary with grain of observation? *Population Ecology*, 51, 33-40.
- 37) 細川真也・三好英一・内村真之・中村由行 (2006) メソコスム水槽におけるアマモ地上部の現存量と生長・脱落速度の季節変動, 港湾空港技術研究所報告, Vol.45, No.3, pp25-45.
- 38) 細川真也・井上徹教・内藤了二・中村由行 (2008) 現地調査に適したアマモ生長量推定方法の開発, 港湾空港技術研究所報告, Vol.47, No.3, pp31-53.
- 39) Yoshida, T., Okamoto, H., Tanaka, Y., Hibino, T., Suzuki, T. & Takabe, T. (2009) Reproduction dynamics of eelgrass (*Zostera marina* L.) populations in Ise-Mikawa Bay, central Honshu, Japan. *Plant Species Biology*, 24, 202-208.
- 40) Reusch, T. B. H., Boström, C., Stam, W. T. & Olsen, J. L. (1999) An ancient eelgrass clone in the Baltic. *Marine Ecology Progress Series*, 183, 301-304.
- 41) Phillips, R. C., Grant, W. S. & McRoy, C. P. (1983) Reproductive strategies of eelgrass (*Zostera marina* L.) (Gulf of California). *Aquatic Botany*, 16, 1-20.
- 42) Aioi, K. (1980) Seasonal change in the standing crop of eelgrass (*Zostera marina* L.) in Odawa Bay, central Japan. *Aquatic Botany*, 8, 343-354.
- 43) Olesen, B. (1999) Reproduction in Danish eelgrass (*Zostera marina* L.) stands: Size- dependence and biomass partitioning. *Aquatic Botany*, 65, 209-219.
- 44) 気象庁気象統計情報, http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/bstv2009.html
- 45) Olesen, B., Marbà, N., Duarte, C. M., Savelle, R. S. & Fortes, M. D. (2004) Recolonization dynamics in a mixed seagrass meadow: the role of clonal versus sexual processes. *Estuaries*, 27, 770-780.
- 46) Robbins, B. D. & Bell, S. S. (2000) Dynamics of a subtidal seagrass landscape: Seasonal and annual change in relation to water depth. *Ecology*, 81, 1193-1205.

付録 A 用語の説明と生殖株のモジュール構造

アマモの栄養株は数枚の葉と葉鞘から構成される。この生殖株は、生殖時期になると形態変化し、茎が垂直に立った生殖株になる (図-A.1)。茎の主軸 (main axis) には節があり、各節には穂 (spathe) もしくは穂の束によって構成される集合体 (rhipidium) が形成される。穂には花が咲き (図-A.2)、そこに種子が形成される。穂やその集合体は成熟すると脱落し、主軸にはその痕跡 (vestige) が残る (図-A.3)。

生殖株のモジュール構造については、本研究の中で調査した。その結果について、以下に示す。

調査方法: 久里浜湾と三河湾において、月に 1 回の間隔で、それぞれ 5 月から 8 月の間と 6 月から 7 月の間に 20 個体の生殖株をサンプリングした。サンプルした生殖株は、モジュール構造が崩れないよう、丁寧に実験室に持ち帰った。モジュール構造は、主軸とそれに接続する枝 (branch) とそれに付属する穂に着目し、それぞれの生殖株において、枝数と穂の数を計数した。穂の数については、各枝に付いている数も計数した。穂もしくはその集合体の脱落した痕跡が確認できれば、その数も計数した。また、穂に含まれる花および種子の数を計数した。

統計解析: 生産された生殖株あたりの穂数および穂の集合体の数を調べるため、穂数 + その痕跡数および穂の集合体数 + その痕跡数の月間の差を ANOVA with TukeyHSD で解析した。

調査結果: 生殖株は、10 程度以上の枝を有し、枝は下側ほど複数の穂の集合体となっていた (図-A.4)。また、穂の 6 割程度以上が集合体の中に含まれていた (表-3.2)。穂数 + その痕跡数は、6 月と 7 月において 5 月よりも有意に多かったが (表-3.2; 5 月と 6 月の比較では $p < 0.001$, 5 月と 7 月の比較では $p < 0.01$), 7 月における痕跡の増加により (7 月に対する 5 月と 6 月の両方の比較で $p < 0.001$), 穂の数は 7 月よりも 6 月の方が多かった ($p < 0.01$)。穂の集合体については、集合体数 + その痕跡数で 5 月と 6 月に有意な差が見られたが ($p < 0.05$), 6 月と 7 月は差が見られなかった。集合体の痕跡はほとんどなかった。

付録 B 種子の密度とサイズ

調査方法: 久里浜湾と三河湾のサンプリングで得られた種子について、密度とサイズを計測した。密度は、50 個の種子を 1 セットとして、1 セットの密度をピクノメー

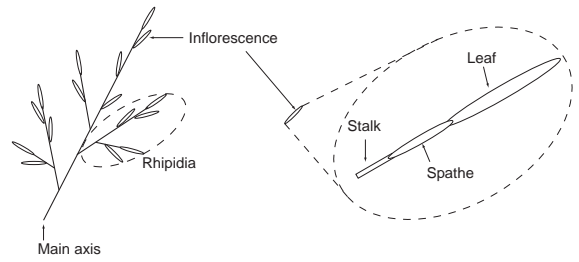


図-A.1 生殖株の模式図

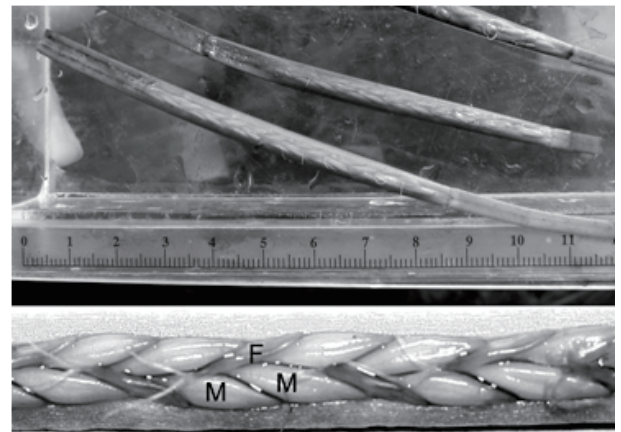


図-A.2 穂の外観 (上図) と雄花 (M) と雌花 (F) (下図)

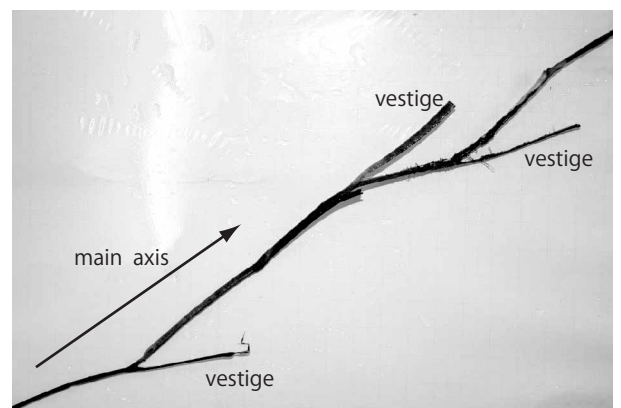


図-A.3 穂の脱落痕跡

タを用いて測定した (ただし、久里浜湾における 5 月のサンプルからは、33 個の種子しか得られなかった)。サイズは、密度測定を行った種子の 1 つずつについて、長径と短径を測定した。測定は、種子を 1mm 目の方眼紙上に配置したものを写真撮影し、画像解析ソフトを用いることで行った。

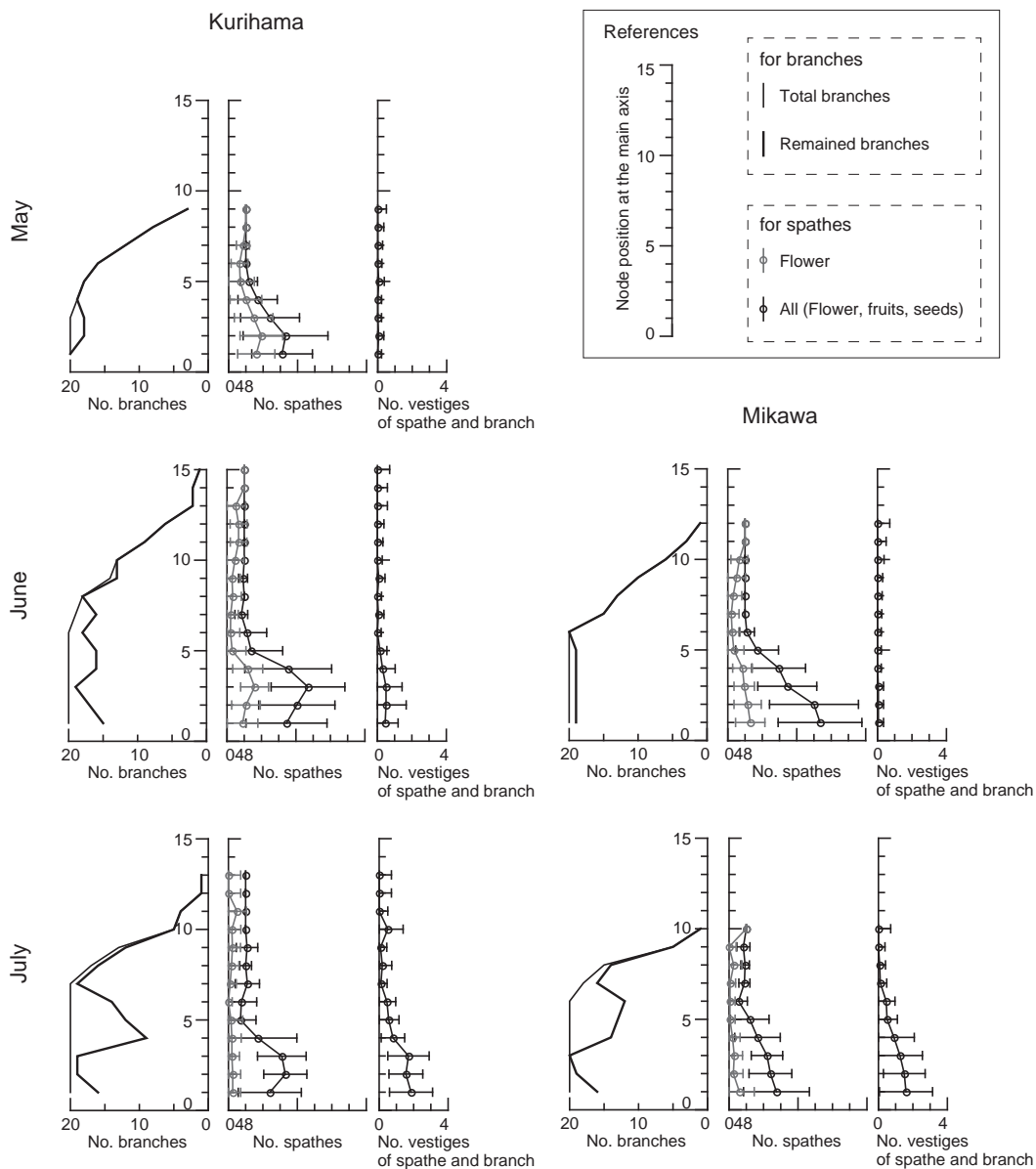


図-A.4 久里浜湾と三河湾におけるアマモの reproductive shoot のモジュール構造.

調査結果：測定結果は表-Bの通りであった。

付録C 種子の発芽

実験方法：久里浜と三河で得られた種子を実験室内のろ過海水をかけ流した水槽に入れ、その発芽の有無を観察した。種子や果実が spathe に含まれる状態で採取されていたものについては、水槽で数日間養生した後、バラバラにほぐして、その時の果実+種子の数を初期値とした。発芽した種子については、室内実験（暗条件に近い状態）のために腐食して他の種子に影響することが想定されるため、確認された時点で除外した。試験結果は、初期値

表-B 種子の物理パラメータ。密度については総サンプルの平均値，サイズについては average ± SD を示している。

Date	n	Density	Length(mm)	Width (mm)
Kurihama Bay				
090511	33	1.04	4.3±0.3	2.1±0.2
090609	50	1.17	4.4±0.2	2.2±0.2
090602,19	50	1.14	4.4±0.3	2.1±0.2
090707(floated)	50	1.10	4.3±0.2	2.1±0.2
090707(sank)	50	1.15	4.4±0.3	2.1±0.2
Mikawa Bay				
090608	50	1.17	3.9±0.3	2.0±0.2
Mesocosm				
060707	35	1.22	3.8±0.2	2.1±0.2
090514	178	-	4.2±0.3	2.4±0.2

アマモ分布域の拡大とそれを支える種子散布

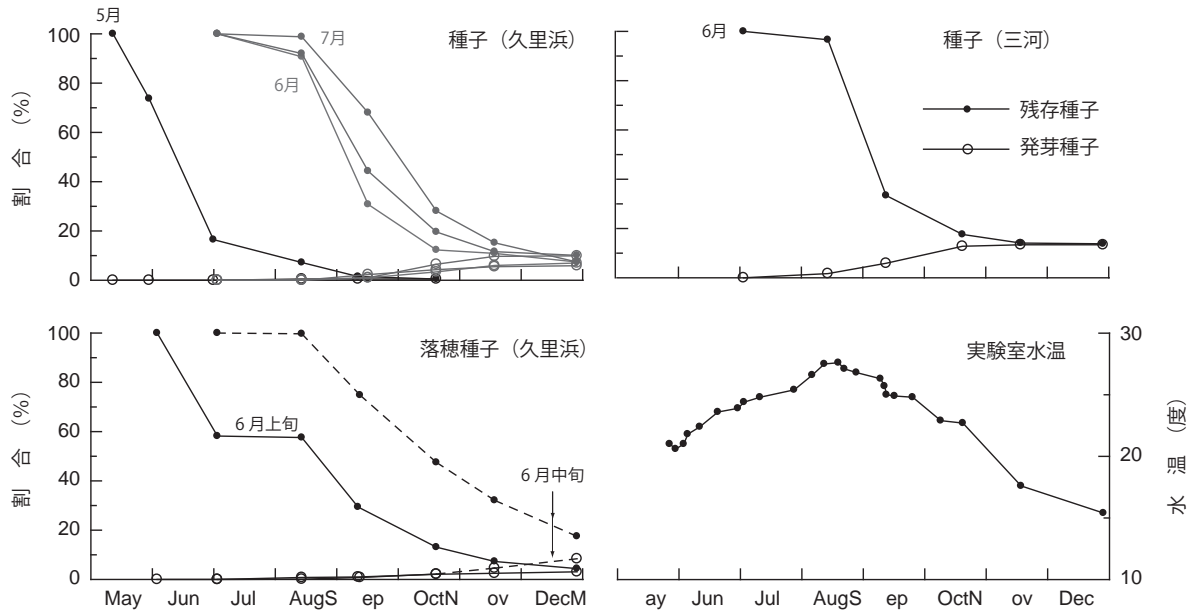


図-C 発芽試験結果. 黒丸は種子の残存率, 中抜の丸は種子の発芽率を示している.

を基準として残存率と発芽率で評価した. 試験中は, 水温も測定した.

実験結果: 種子は, 9月から10月くらいの間(25度程度から20度程度に下がる期間)から発芽し始め(図-C), 実験終了時(12月)における発芽率はおおむね10%程度(表-C)であった.

表-C 種子の最終残存率と発芽率.

Date	n	Remain rate(%)	Germination rate(%)
Kurihama Bay			
090511	388	0.5	0.5
090609	497	7.4	7.0
090602	521	4.4	3.1
090619	787	17.5	8.4
090707a	526	10.1	9.9
090707b	256	7.4	5.9
Mikawa Bay			
090608	290	13.8	13.4
Mesocosm			
090514	1172	3.4	3.4

港湾空港技術研究所報告 第49巻第3号

2010.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles - Simultaneous field observation of turbulence and DO in the benthic boundary layer - Tetsunori INOUE, Ronnie N. GLUD, Henrik STAHL, Andrew HUME	3
Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, <i>Zostera marina</i> L. Shinya HOSOKAWA, Masahiro NAKAOKA, Eiichi MIYOSHI, Tomohiro KUWAE	31
Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling Hitoshi NOGUCHI	51
Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions Hiroyuki YAMAZAKI, Shouichi EMOTO	79
Rupture Process of Recent Crustal Earthquakes in Japan Estimated by Waveform Inversion Atsushi NOZU	111
Evaluation of intertidal flat stratigraphy by MASW technology —Interpretation of shear wave velocity structure and safety assessment of artificial intertidal flats— Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Tomohiro KUWAE, SoonBo YANG, Masanori TANAKA	157