

アマモ種子の鉄コーティングによる 着底・生長促進技術の開発

PROMOTION TECHNOLOGY OF BOTTOM-CLINGING AND GROWTH BY IRON-COATED EELGRASS SEEDS

瀬戸雅文¹・竹内登世子²

Masabumi SETO and Toyoko TAKEUCHI

¹正会員 水博 福井県立大学 生物資源学部海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町1-1)

²生修 福井県立大学 生物資源学研究科海洋生物資源学専攻 (〒917-0003 福井県小浜市学園町 1-1)

Because specific gravity would increase if the surface of a seed is coated with iron powder, the stability of wave-induced current increased. The improvement mechanism of stability was brought about by 13% of partial subsidence of the minor axis generated into the seed. The iron-coated seed subsided in the valley part of sand ripple generated in a bottom surface, and was buried with disappearance of the ripple. Therefore, the burial depth of the seed can be presumed from the wave height of sand ripple.

The germination rate increased the eelgrass seeds by iron-coating. Furthermore, the time which a bud emergence takes was shortened by about one month, and also increased the bud emergence rate by about 3 times. The reason is because a sprout of eelgrass seeds is promoted by an anaerobic condition. From this research, the appropriate coastal region for direct sowing of iron-coated eelgrass seeds, sowing period, and sowing density can be presumed.

Key Words : Iron-coated, Eelgrass seed, *Zostera marina*, subsidence, construction of *zostera* bed

1. はじめに

近年, 沿岸域における藻場の消失や衰退が進行し, アマモ場においても修復や保全に向けた調査・研究が実施されている。従来におけるアマモ場の造成は, 沖側の造成限界を光量より, 岸側の造成限界を波浪等による地下茎の流失条件より決定した上で, 陸上で種子より培養した未生株や, 周辺のアマモ場より採取した栄養株を移植する株植法や, アマモ種子を直接海域より散布したり, シート内に埋め込んでシートごと砂地盤内に埋設する播種法などによって実施されてきた。しかしながら, これらの手法の多くは, 潜水作業や大規模な土木工事を伴うため, 造成に伴う諸作業が周辺環境におよぼす影響や便益面より, 造成海域や造成面積が制限されるなどの問題点が認められる。また, 海域に播種されたアマモ種子の発芽率が低い原因として, アマモ種子が嫌気土壌中で発芽・生長し, 苗立ちする嫌気発芽特性が指摘されている¹⁾。すなわち, 本種が有性生殖の過程で実海域に着生するためには, 種子が底質内に埋設する必要があり, そのためには地下茎の流失条件と比較して, さらに高い波浪静穏性が要求される。

本研究は, 鉄粉でコーティングしたアマモ種子を船上より播種する粗放的な造成工程のみによって,

種子の散布適地の広域化や, 発芽の促進が期待できる新たなアマモ場造成技術を開発した(図-1参照)。

具体的には, 種子の高比重化による流失抑制効果, 種子の底質内への埋没特性, および種子表面に付着した鉄粉の脱酸素化に伴う発芽促進効果を水理実験や培養実験を実施して確認し, 鉄コーティング種子による粗放的なアマモ場造成手法を開発した。

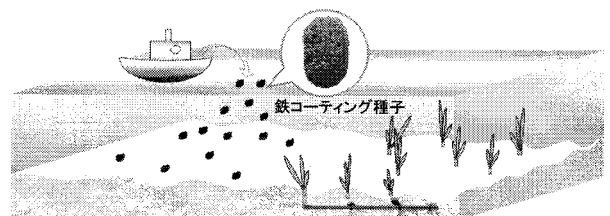


図-1 粗放的なアマモ場造成のイメージ

2. 種子の高比重化による流失抑制効果

(1) 種子埋没仮説の設定

波浪や流動に対する粒径の均一な砂面の安定性については, シールズ数などの無次元指標が提案されている。底質の安定性に準じて砂面上におけるアマモ種子の安定性を考察すれば, 種子の比重は砂粒子

と比較して小さいものの、粒径がオーダー的に大きいため、アマモ種子においては、砂粒子と比較して剪断抵抗力が増加し、波浪や流動などの外力で底質表面の砂粒子が掃流移動を開始以降も砂面上に定位している可能性が示唆される。この場合、アマモ種子には局所洗掘に伴う沈下（以降、局所沈下と呼ぶ）が発生し、局所沈下に伴うアマモ種子の剪断抵抗力の増加によって、力学的な安定性が向上することが期待できる。更に、底質の移動によって海底面に砂漣が形成されると、アマモ種子は砂漣の谷部に埋没することが考えられる。すなわち、波や流れなどの外力が作用して底質が移動を開始した以降も、局所沈下を伴いながら底質上に定位しているアマモ種子は、砂漣の影響を受けて、平均地盤面より砂漣の振幅程度まで沈下し、外力の低下に伴う砂漣の消滅とともに、地盤内に埋没することが考えられる。

(2) 局所沈下モデル

図-2 に示すように、アマモ種子（長径 a 、短径 b 、密度 ρ_a ）が、底質（平均粒径 d ）の砂面上に着底後、水平方向より底層流（平均流速 u_b ）を受けながら、深度 c だけ局所沈下した場合の安定性について検討する。アマモ種子の長軸が主流方向に対して迎え角 $\pi/2$ で定位している場合の断面二次元流れを取り扱う。アマモ種子の物理的な移動限界における力の平衡条件は、局所沈下後の静止摩擦角を θ_b と定義すると、種子と底質第1層目の砂粒との接点のまわりの回転モーメントについて検討すれば

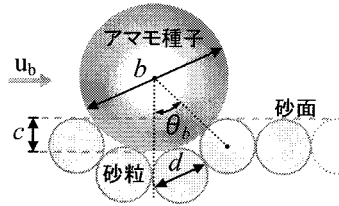


図-2 局所沈下モデル

$$F_T = (W - F_L) \tan \theta_b = \frac{1}{4} \alpha K \pi a b f \rho u_b^2 \quad (1)$$

ここに、 F_T は種子に作用する水平方向の力、 f は底面摩擦係数、 ρ は海水密度、 K は任意の比例定数、 α は局所沈下に伴う剪断応力の低下率で、底面境界層内における流体力の沈下率に伴う変化として理論的な検討も可能であるが、本研究では、沈下時の移動限界条件より実験的に決定した。また、(1)式におけるアマモ種子の水中重量 W 、および $\tan \theta_b$ はそれぞれ次式で定式化できる。

$$W = \frac{1}{6} (\rho_b - \rho) g \pi a b^2 \quad (2)$$

$$\tan \theta_b = 2 \sqrt{\frac{(b+d)c - c^2}{(2c-b-d)^2}} \quad (3)$$

これら諸元を(1)式に代入し、局所沈下の効果を考慮可能なアマモ種子の安定指標 Ψ_c を導出した。

$$\Psi_c = \frac{2}{3\alpha K \tan \theta_b} = \Psi_b \frac{(2c-b-d)}{2\sqrt{3c(b+d-c)}} \quad (4)$$

ここに、 Ψ_b は底質の安定指標であるシールズ数において、底質粒径をアマモ種子の短径 b 、底質比重をアマモ種子の比重 ρ_b で置き換えた無次元数で、 Ψ_c は、種子のシールズ数に局所沈下の効果を加味した新たな安定指標と位置付けることができる。(4)式は種子の比重および粒径が底質粒径と等しく、局所沈下を生じていない場合には、従来より使用されているシールズ数と完全に一致する。なお、(1)式における揚力 F_L は、他の項と比較してオーダー的に小さいため質量力と共に無視した。

(3) 種子安定性実験の概要

供試種子は、第3章(2)で説明する方法でアマモ種子に対する鉄粉の重量比（コーティング比）を0.0（種子のみ）～4.0まで段階的に変化させることによって形成した鉄コーティング種子を使用した。

鉄コーティング種子の沈下特性実験、流動耐性実験、および埋没特性実験には、図-3 に示すように、観測部を中央より主流方向に2水路に瀬割りした小型振動流水槽を使用した。

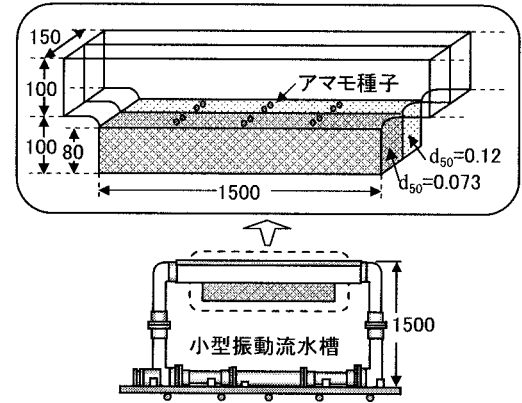


図-3 種子安定実験概要図

各水路底部の砂層箱に砂層厚 8cm まで中央粒径 0.12mm、および 0.073mm の珪砂を敷きつめた。水路砂面上に様々なコーティング比の種子を配置した上で、実海域を想定した周期 3～12 秒、流速振幅 0～25cm/s の振動流を作用させて、流速の増加に伴う種子の移動状況をデジタルカメラで記録し、動画解析より種子の局所沈下量や移動限界流速を求めた。

埋没特性実験では、水槽内に珪砂を敷き詰めた状態で、一定時間振動流を作用させて砂面上に砂漣を形成後、砂漣の谷部に比重 2.2～7.8、直径 3.0～9.8mm の高比重小型球体、および鉄コーティング種子を配置した。振動流に 5cm/s の定常流成分を重合することによって砂漣を一定方向に移動させ、一定時間ごとにデプスマイクロメータを用いて砂漣通過に伴う高比重球体および種子の埋没深度を計測した。

(4) 局所沈下と移動限界条件

図-4 は、流速振幅の増加に伴い、鉄コーティング種子が移動を開始する直前における種子の局所沈下率（種子の短径と局所沈下量の比 c/b ）と、砂のシールズ数 ψ_d の関係をプロットしたものである。これより、鉄コーティング種子の局所沈下率は、底質のシールズ数に依存して変化し、 ψ_d が 0.02 程度より、急速に発達し、種子短径の 0.13 倍程度まで埋没した後に、緩やかに低下している状況が確認された。一般に砂の移動限界シールズ数が 0.05 程度であることより推察すれば、 ψ_d が 0.02 以降の急激な埋没率の増加は、静的洗掘に伴い形成され、埋没率がピーク以降の緩やかな減少は、種子周辺の底質の移動に伴い種子近傍の渦構造が阻害され、埋没深が低下する動的洗掘に依存して形成されるものと推定された。鉄コーティング種子の埋没率は、コーティング比が 4.0 までの範囲内においては、コーティング比によらず次式で評価できる。

$$c/b = 0.15 \exp(0.27 - 7.7\psi_d - \exp(7.7 - 3.5 \times 10^3 \psi_d)) \quad (5)$$

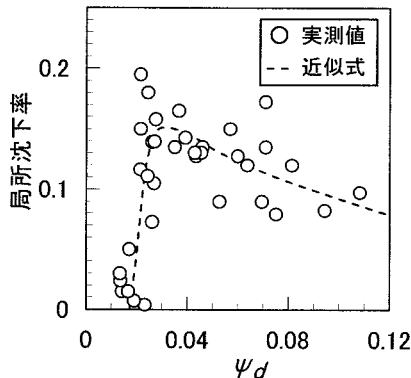


図-4 鉄コーティング種子の局所沈下率

図-5 は、(4)式より計算される鉄コーティング種子の初期移動限界指標 ψ_{cs} 、および全面移動限界指標 ψ_{ce} を鉄コーティング種子の比重 ρ_a をパラメータとして示したものである。これより、局所沈下が考慮された安定指標は、種子比重 1.132（鉄コーティング無し）のケースを除いて、種子の比重によらず、初期移動限界指標で 0.0084、全面移動限界指標で 0.016 程度の値で統一的に評価された。鉄コーティングを施さない天然の種子の移動限界指標値が他と比較してオーダー的に小さいのは、局所沈下が発生する以前に種子の流失が生ずるためと考えられる。また ψ_{cs} における実験値が ψ_{ce} と比較してばらついているのは、移動実験における主流の流速振幅の増分（平均 1.5cm/s）に起因する測定誤差が、移動限界流速値の小さな初期移動限界指標に大きく表れたためと推定される。

図-6(a) は、局所沈下に配慮した種子の移動限界指標 ψ_{cs} および ψ_{ce} と、同一条件下における底質の移動限界シールズ数 ψ_d との関係を示したものである。これより、(4)式で導出した種子の安定指標

と砂のシールズ数の間には一次的な相関は認められず、砂のシールズ数をもとに種子の移動限界条件を推定することは困難であることが示唆された。

ψ_{cs} および ψ_{ce} と、底質の移動限界シールズ数（概ね 0.05）との差が、(4)式における局所沈下に伴う剪断応力の低下率 α に相当するものと考えた上で、局所沈下率をパラメータとして α をプロットすると図-6(b)となる。これより、沈下率の増加とともに α は増加し、 ψ_{ce} で 0.33、 ψ_{cs} で 0.20 程度に収束している。局所沈下の発生によって、流体力が作用する種子の射影面積の低下や、沈下に伴い流れに対する種子の形状も変化し、剪断力も減少することが推察される。また、局所沈下率の小さな領域における α の低下は、低レイノルズ数領域における抗力係数の急激な増加過程などとの関連性も推察された。

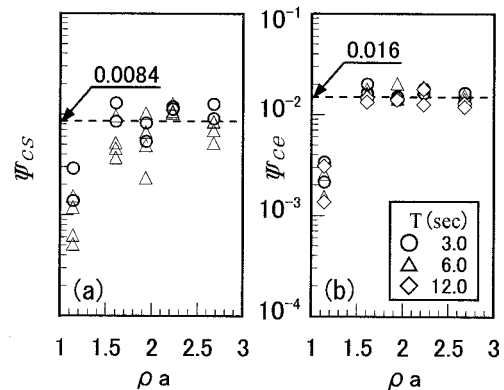


図-5 鉄コーティング種子の移動限界指標

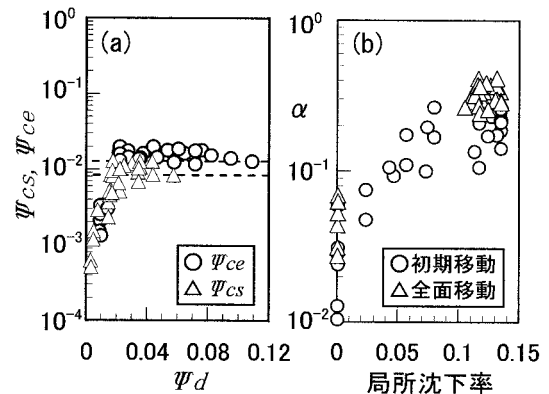


図-6 移動限界指標の諸特性

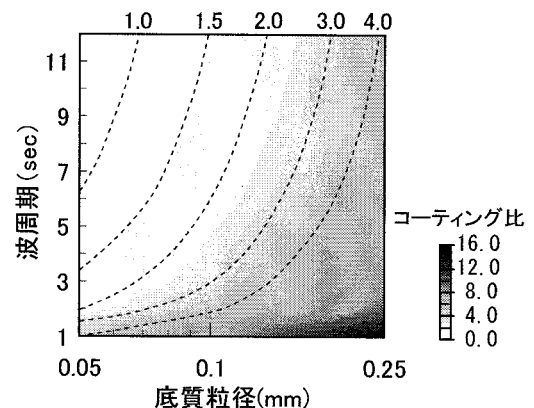


図-7 コーティング比の選定条件

図-7は、底質の移動限界シールズ数を0.05で評価した上で、図-5における鉄コーティング種子の移動限界条件をもとに、海底面に作用する外力が徐々に増加して、底質の移動が開始した以降においても、鉄コーティング種子が砂面上に定位するために必要となるコーティング比を算出し、底質粒径、および波周期をパラメータとして示したものである。

これより、アマモ場造成海域の底質粒径、および波周期が与えられれば、図-7をもとに、底質が移動し、砂漣が形成された以降も、鉄コーティング種子が着底位置付近に留まるために必要となる最小コーティング比を選定することができる。

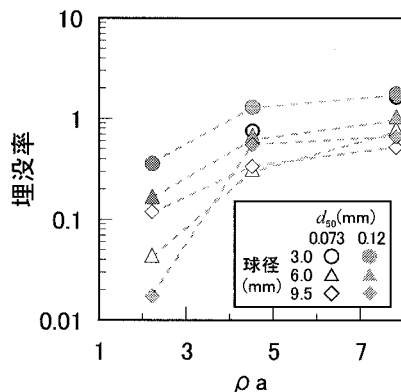


図-8 鉄コーティング種子の埋没率

(5) 砂漣形成に伴う埋没特性

本研究では、砂漣の移動状況下において、小型球体直上を通過した砂漣の中で、谷部の深度が最も発達した砂漣波高の、谷部砂表面より小型球体の底部までの埋没深度を、球径で基準化した値を埋没率と定義した。従って、球全体が砂面内に完全に埋没した場合の埋没率が1に相当する。

図-8は、小型球体の比重の変化に伴う埋没率の変化を、球径と底質の中央粒径(d_{50})をパラメータとして示したものである。これより、高比重で球径の小さい球体ほど、埋没率が大きいこと、および、球体の埋没率は1程度に上限をもち、球体が底質内に完全に埋没すれば、それ以上の沈下は生じないことが確認された。また、球体の比重の低下とともに埋没率も減少し、アマモ種子の短径に最も近い粒径3mmの小型球体においては、埋没率が0.1程度の値をとり、鉄コーティング種子を用いた、図-4の局所沈下率におけるピーク値(0.13)とほぼ一致した。

また、砂漣の移動状況下における小型球体の挙動は、砂漣の通過前後における水平方向への移動は極僅かに留まり、鉛直方向には砂漣谷部の通過に伴う沈下のみに応答し、砂漣峰部の通過に伴う浮上移動は認められなかった。更に、砂漣谷部の通過に伴う沈下のみに応答する特性は、鉄コーティング種子を用いた同様な実験においても確認された。

すなわち、鉄コーティング種子などの高比重の小型球体は、砂漣の発生・発達とともに、局所沈下率

より求まる沈下深度に砂漣の振幅を加算した深度まで沈下し、砂漣が消滅した後も砂面上に上昇することなく底質内に埋没することが確認された。

従って、アマモ場造成海域で発生する砂漣の波高を算定できれば、鉄コーティング種子の埋没深度も推定することが可能となる。

3. 鉄コーティング種子の生育特性

(1) 供試種子

本研究で使用したアマモ種子は、2007年6月中旬に福井県小浜市甲ヶ崎地先のアマモ群落より花枝を採取後、種子を取り出して福井県栽培漁業センターにて9月下旬まで養生後、飽和食塩水(約26%)で良質選別した個体を使用した。選別されたアマモ種子(平均長径3.41mm, 平均短径0.183mm)は、水温20℃に設定された60Lアクリル水槽に、種子湿重量の2倍に相当する粒状活性炭と混合状態で多段収容し、暗条件下で濾過海水をかけ流しながら保存した。なお、粒状活性炭は2週間ごとに交換を行った。

(2) 鉄コーティング種子の形成

アマモ種子をコーティングする材料にはDOWA IP クリエイション(株)より提供を受けた鉄粉(平均粒径 $40.8\mu\text{m}$)を使用した。鉄粉は比重が7.87の高比重材で安価(1ha造成当たり1000~15000円程度)に入手が可能であり、コーティング比を自由に設定することができる。また、磁性体であることから、鉄コーティング種子の、磁力による誘導なども検討できる²⁾。鉄粉は、海水中で自然酸化により酸化鉄(錆)や水酸化鉄に変化するが、酸化鉄は溶解度が低く、不動態として存在するため、外洋域、沿岸域を問わず海水中における溶存鉄濃度は極めて低いことがわかっている。また、酸化鉄や水酸化鉄は生体膜を通過できないため、植物プランクトンの吸収や増殖に寄与しないことも報告されている。一方、腐植土中で鉄イオンとフルボ酸が結合したフルボ酸鉄(有機鉄)の低下が、磯焼けの持続要因と関連して指摘されるとともに、外洋域における植物プランクトンの増殖を目指した硫酸鉄の散布実験が実施されたり、リン酸鉄やクエン酸鉄添加培地を用いた培養実験より赤潮藻の増殖効果が報告されている。鉄コーティング種子は、金属鉄の酸化作用を利用して種子表面に鉄粉を付着させることから、海水中に播種した後も、難溶性の酸化鉄としての性質を有し、海域環境へおよぼす影響は少ないものと考えられる。

鉄コーティングは、鉄粉の酸化(錆)に伴う付着作用を利用して種子表面を被覆するもので、詳細については、既にイネ種子で研究が進展している³⁾。本研究では、鉄粉の酸化促進剤として焼石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)、および海水を使用した。

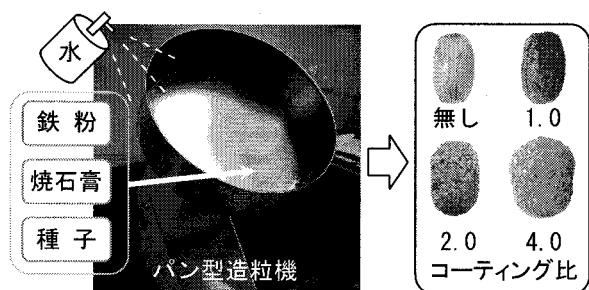


図-9 鉄コーティング種子の形成方法

鉄コーティング種子の形成手順は、図-7をもとに、造成海域の諸条件より予めコーティング比を決定後、アマモ種子の必要量よりコーティング比をもとに鉄粉量を決定する。図-9に示すように、予め表面を湿らせた種子適量と、焼石膏を10%程度混合した鉄粉を造粒機に投入後、水をスプレーしながら回転を開始する。鉄粉混合物が種子の周りに付着したら、更に所要量まで鉄粉混合物を追加し、鉄粉混合物をすべて種子に付着させた後、種子同士や種子が器壁に付着しないように多めに水をスプレーする。塊状のまま造粒機内に放置すると酸化発熱による種子の死滅が発生するため、造粒機より直ちに種子を取り出し、一層配置で自然乾燥させた。なお、焼石膏の代わりに海水を使用する場合には、水スプレの代わりに海水を噴霧し酸化を促進させた。

図-10(b)は、形成された鉄コーティング種子の乾燥時間と水分率の関係をコーティング比をパラメータとして示したものである。これより鉄粉の酸化に海水を使用すると乾燥に伴う水分の蒸発がコーティングを施さない場合に次いで顕著に認められた。

図-10(a)は、鉄コーティング種子のコーティング比による比重変化を示したものである。鉄コーティング種子の比重とコーティング比に一次的な関係が認められないのは、コーティング比の増加とともに、被覆鉄粉間に形成される空隙（焼石膏含む）の影響が反映されたものと考えられる。

(3) 鉄コーティング種子の乾燥耐性

海産頭花植物であるアマモにおいては、種子の乾燥条件がその後の生残に影響をおよぼすことが考えられる。アマモ種子は淡水に浸透することで発芽に要する期間が短縮されるとともに発芽率も向上することが培養実験より指摘されている⁴⁾。

本研究では、淡水処理に伴うアマモ種子の発芽促進効果を利用して、鉄コーティング種子の形成後の乾燥時間が発芽率におよぼす影響について検討した。コーティング比の異なる鉄コーティング種子を形成し、コーティング後の乾燥時間を1, 3, 6時間と変化させて、乾燥させた種子を水温20℃で淡水処理を行って発芽率を比較した。

図-11は鉄コーティング種子形成後の乾燥時間と発芽率の関係をコーティング比をパラメータとして

示したものである。これより、発芽率はコーティング比の増加とともに徐々に低下傾向を呈するが、乾燥時間1時間以内であれば何れのコーティング比においても8割以上で発芽が認められることから、本手法を実海域で実施する際には、船上で鉄コーティング種子を形成するか、鉄コーティングされた種子を表面が乾く程度まで乾燥させた後、1時間以内に海水で充填したコンテナなどに移した上で、海水飽和状態で播種海域まで運搬後、播種するなどの対策を検討する必要性が認められた。

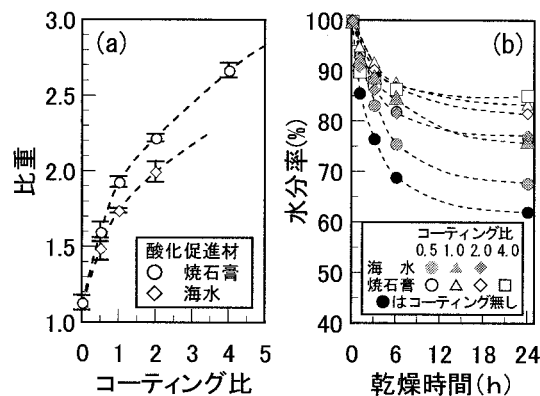


図-10 鉄コーティング種子の諸特性

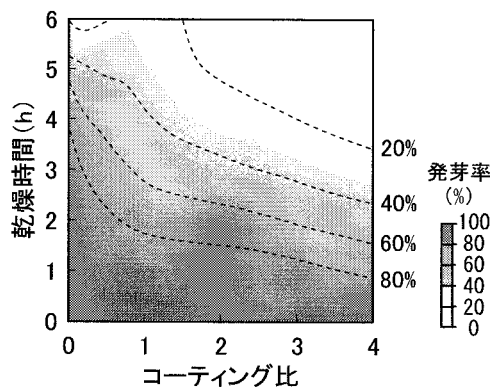


図-11 乾燥時間による発芽率の変化

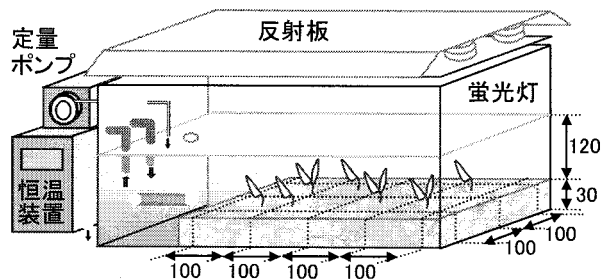


図-12 培養実験の概要図

(4) 鉄コーティング種子の出芽率

鉄コーティング種子の培養実験の概要図を図-12に示す。培養では、8号珪砂（中央粒径0.073mm）に腐葉土を30%配合した底質を、水槽底部に砂層厚30mmまで敷き詰めた上で、10cm×10cmの8区画に区

割りした。酸化促進材に焼石膏および海水を用いて形成したコーティング比が、それぞれ0.5, 1.0, 2.0, 4.0, および0.5, 1.0, 2.0の鉄コーティング種子と、鉄被覆を施さない種子の計8ケースについて、各区画ごとに10粒ずつを埋没深度1cmとなるように収容した。水槽内に水深15cmまで精密濾過海水を満した上で、水温10℃で通水培養した。水槽の上部より色温度やスペクトル分布が太陽光に近い光源（Spirallite, SP-55）を用いて底面上の光量が100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ になるように調光し、12LDで培養した。

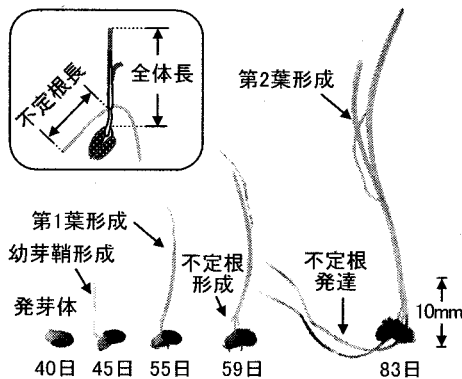


図-13 鉄コーティング種子の生長過程の一例

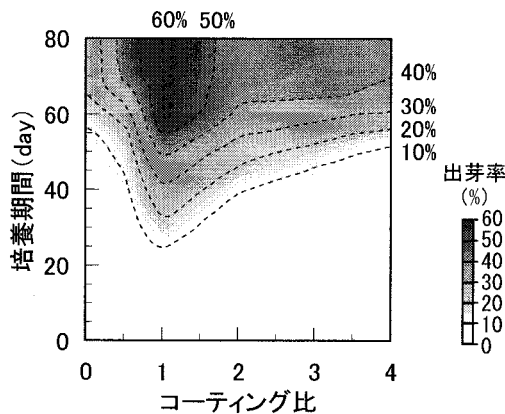


図-14 鉄コーティング種子の出芽率

鉄コーティング種子は図-13に示すように、発芽後、幼芽鞘を伸長させ、続いて、第1葉、不定根、第2葉の順に形態が形成され、コーティング比による生長過程の差は認められなかった。

図-14は、鉄コーティング種子の出芽率を培養期間とコーティング比をパラメータとして示したものである。これより、鉄コーティング種子は、培養を実施した全てのコーティング比において、鉄コーティングを施さない種子と比較して出芽に要する期間が短縮し出芽率が向上した。特に、コーティング比1.0のケースにおいては、出芽期間が1ヶ月程度短縮され、出芽率も3倍程度向上することが確認された。鉄コーティング種子を用いた播種法は、従来の播種法と比較して、安価で、容易に、種子の安定性と出芽率の向上を実現可能な新たな造成法である。

4. 結論

鉄コーティング種子を用いたアマモ場造成手法の実施手順を図-15に示す。まず、対象海域周辺の波浪流や流れの条件をもとに、図-7よりアマモ種子の鉄コーティング比を決定する。続いて、図-14より推定される、鉄コーティング比に対するアマモ種子の培養期間をもとに、鉄コーティング種子を形成し散布を実施する播種時期を決定する。次に、対象海域周辺における波浪・底質条件をもとに、当該域周辺で発生が予測される砂漣の波高分布に、図-8で示される埋没率を加味しながら、当該域周辺におけるアマモ種子の埋没深度の平面分布を推定し、播種適地を選定する。最後に、図-14より推定できる鉄コーティング種子の出芽率と、造成したいアマモ場密度をもとに播種密度を決定し、アマモ場の造成面積に播種密度を乗ずることによって播種に必要な種子数が算定されるため、第3章(2)の手順に従って、鉄コーティング種子を形成後、1時間以内に造成対象海域に播種することによって、粗放的なアマモ場造成が可能となる。

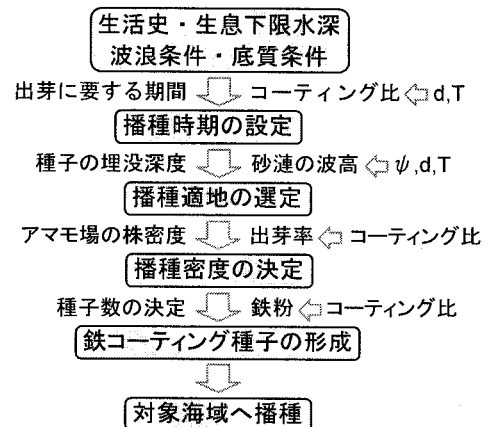


図-15 アマモ場造成フロー図

謝辞：本研究の遂行にあたり、近畿中国四国農業研究センターの山内稔博士にはイネ種子の鉄コーティング法について指導を受けた。福井県立小浜水産高等学校よりアマモ種子の提供を受けた。五洋建設株式会社の伊豫田紀子氏より貴重な助言を得ている。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 川崎保夫ほか：アマモ場造成法に関する研究，電力中央研究所報告，U14，pp. 1-231，1988。
- 2) 服部志穂，瀬戸雅文，青山勲：顆粒状基質を用いた海藻種苗の粗放的移植技術の開発，海洋開発論文集，第23巻，pp. 435-440，2007。
- 3) 山内稔：水稻の鉄コーティング湛水直播，農業および園芸，第79巻9号，pp. 947-953，2004。
- 4) 山本克則，小河久朗，吉川東水，難波信由：アマモ種子における塩分および温度制御による発芽促進効果，水産増殖，第54巻3号，pp. 347-351。