

アマモ種子の埋没機構に関する研究

島谷 学*・中瀬浩太**・熊谷隆宏***・月舘真理雄****

1. はじめに

アマモ (*Zostera marina*) は沿岸の浅海域に分布する海草である。その群落は海産生物の産卵場や仔稚魚の保護育成場として機能しており, その水産資源涵養の機能は古くより認識されている。さらに, 近年では沿岸生態系の保全という観点からもその重要性が認識されるようになり, 港湾・海岸事業でもその保全に取り組んでいる。

アマモ場は播種および株の移植によって造成されるが, その際にはアマモ場の外力に対する成立条件を明らかにする必要がある。これに関わる研究は, 過去に丸山ら (1987), 中瀬ら (1992, 1999), 森口ら (1999) などによって行われているが, これらの研究はアマモ場全体の成立条件という巨視的な捉え方に止まっており, アマモの生態まで言及している例はほとんど無い。

アマモが自身の群落を維持拡大するには, 2つの戦略をとることが知られている。地下茎の伸長によるもの(無性生殖)と種子の発芽によるもの(有性生殖)である。このうち, 種子の発芽についてはそのメカニズムの研究も進み, 嫌気状態下において発芽することが明らかになっている (川崎ら, 1988)。

ただし, 種子の周辺環境が嫌気状態になるためには, 種子が海底面下に埋没しなければならない。したがって, アマモ場の維持拡大を図る上では種子埋没機構の解明が不可欠となる。しかしながら, 種子埋没機構についての詳細な検討は現在までほとんどなされておらず, 種子の挙動を解明する上で重要な, 種子の寸法・比重・沈降速度等の諸元について厳密な調査を行った例も見られない。

そこで本研究では, アマモ種子の物理諸元を明らかにし, 埋没機構に関する水理実験を行うことで, 底質よりはるかに比重が小さいと予想されるアマモ種子の埋没条件を探った。さらに, 現地調査および数値計算によるアマモ実生発芽体の分布条件と水理実験結果とを対比させることで, 種子の埋没機構及び埋没条件の再評価を行い,

アマモ場造成における適地選定の際の指標を提案した。

2. 種子の埋没機構

種子が海底に埋没する理由を底質の移動形態に着目して推察すると, 以下の2つの機構が考えられる。

埋没機構①: 浮遊移動下において, 底質と共に舞い上がった種子が沈降速度の差によって埋没する。

埋没機構②: 掃流移動下において, 種子と底質の移動抵抗差によって底質が種子上を覆い, 埋没する。

埋没機構①については種子の沈降速度を明らかにする必要がある。しかしながら, この現象は入射波浪の波長や波の不規則性が綿密に関連していることが予想され, 水理実験においては相似則の問題等もあり現象を的確に捉えることは困難である。したがって, 本研究では種子の沈降速度を測定し, 浮遊砂状態下における種子埋没の可能性を探るに留めた。

埋没機構②については, 種子及び底質の移動抵抗に着目すれば水理実験による検討が可能である。本研究では, 無次元パラメータである Shields 数を用いて外力条件を評価し, 種子を用いた移動床実験及び現地調査, 数値計算を行うことで, 種子の埋没好適条件を検討した。

3. 種子の物理諸元

花枝より放出された種子は海底に沈降し, 波や流れによって移動しながら海底面下に埋没する。また, 花枝より切り離された花穂(鞘)が種子を内包したまま沈降し, 種子同様埋没する可能性も考えられる。

そこで, 種子および花穂の物理諸元を調査するため, 1999年6月26日に千葉県富津市竹岡海岸(図-1)においてアマモ花枝の採取を行った。そして, 海水中で3週間通気養生した後, 花穂と種子を摘出し, 比重(単位体積重量)・寸法(粒径)の計測を行った。検体数は種子については1,000粒, 花穂については100個である。

アマモ種子を写真-1に示す。また, 種子の測定結果を表-1に, 花穂の測定結果を表-2に示す。なお, 表中の値は全検体の平均値である。

沈下している花穂は葉繊維の腐敗が進み, 種子のほとんどが放出されていた。したがって, 種子が海底面下に

* 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所

** 正会員 五洋建設(株)技術研究所

*** 正会員 Ph.D. 五洋建設(株)技術研究所

**** (株)水棲生物研究所

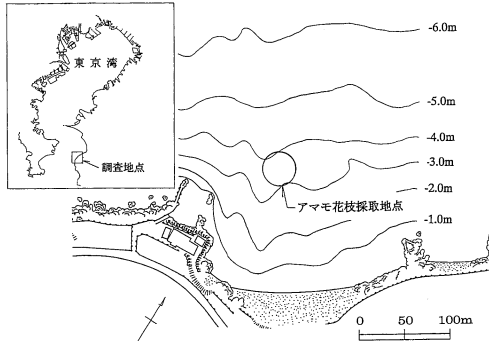


図-1 アマモ花枝採取地点

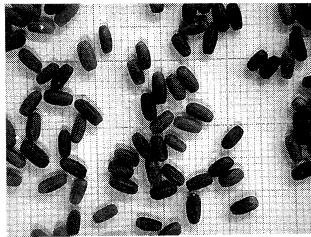


写真-1 アマモ種子

表-1 種子の粒径及び比重

長径 (cm)	短径 (cm)	比重
0.382	0.179	1.262

表-2 花穂の寸法及び比重

長さ (cm)	幅 (cm)	高さ (cm)	比重
5.8	0.5	0.2	1.058
6.0	0.6	0.3	0.937

*上段は沈下していた花穂、下段は浮上していた花穂

埋没するには花穂ごとではなく、放出された種子が単体で埋没すると考えた方が妥当であろう。

また、同地点において底質の採取を行い、諸元調査を行った結果、中央粒径 d_{50} は 0.18 mm、密度は 2.652 g/cm³ (2652 kg/m³) であった。

4. 種子および底質の運動諸元

(1) 沈降速度

種子の埋没を漂砂現象から捉える場合、種子および底質の沈降速度も重要な諸元の1つになる。種子の比重は底質のそれに比べ半分程度であるものの、粒径が底質よりはるかに大きく、もし沈降速度が大きければ漂砂現象に伴い海底面に埋没する可能性も大きくなる。

アマモが分布する海域の底質は細砂が主で、この細砂の沈降速度は式(1)に示すルビー式によって算出可能

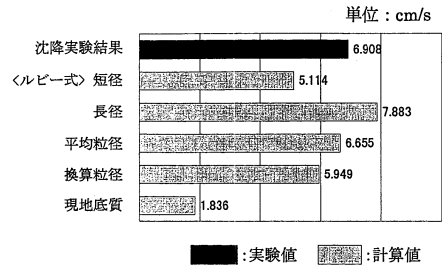


図-2 種子の沈降速度

である。しかしながら、俵型のアマモ種子の沈降速度はこの球形粒子を対象としたルビー式によって算出ができるか不明であった。そこで本研究では、アマモ種子の沈降速度を沈降実験により測定した。また、この実測値とルビー式による計算値とを比較することで、種子の沈降速度がルビー式を用いて評価できるかどうか検討を行った。

$$\frac{W_f}{\sqrt{(s-1)gd}} = \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{(s-1)gd^3}\right)} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{(s-1)gd^3}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 W_f は沈降速度、 ν は水の動粘性係数、 s は比重、 g は重力加速度、 d は粒径である。

沈降実験には外径 216 mm、内径 200 mm、高さ 1,000 mm の透明プラスチック製円筒管を用い、沈降速度が定常になった後 40 cm 間の通過時間を測定して沈降速度を算定した。検体数は 150 粒で 1 粒ずつ計測した。

測定結果を図-2 示す。また、式(1)を用いて算定した種子および現地底質の沈降速度も併せて示す。ここで種子の平均粒径は短径と長径の平均値、換算粒径は種子の体積より等径長を換算した値である。

図-2 より、種子の沈降速度は平均粒径を用いればルビー式によって算定可能であることが確認できる。また、種子の沈降速度は現地底質の 1.836 cm/s と比べ遙かに大きく、波の通過によって巻き上げられた種子と砂が共に沈降する際、種子の方が早く着底するという現象が現地にて生じていることがこのことからうかがえる。

(2) 摩擦抵抗

海底面上にある物質は波や流れなどの外力を受けるのと同時に、自身の重さによってそれに抵抗している。物質を動かそうとする力とそれに抵抗する摩擦抵抗の比は、式(2)のように Shields 数として定義される。

$$\phi = \frac{\rho_w u_*^2}{(\rho_s - \rho_w)gd} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ϕ は Shields 数、 u_* は摩擦速度、 ρ_s は底質の密度、 ρ_w は水の密度、 d は粒径である。

式(2)より、比重が軽くとも粒径が大きければ Shields 数は小さくなる事が分かる。アマモ種子の比重は現地

底質の半分程度であるものの粒径は10倍以上あるため、アマモ種子がそれを取り巻く底質よりも安定している可能性は大きいと考えられる。

5. 水理実験

アマモ種子の海底での挙動および埋没する外力条件を明らかにするため、水理実験を行った。

(1) 実験設備および使用材料

水理実験には図-3示すような、透明アクリル製の水槽を用いた。この水槽の一端には規則波が造波可能な造波機が設置されている。また、造波機と対向する一端には消波材を設け、反射波による影響を極力低減させた。

種子については竹岡海岸で採取した実物を使用した。これは、種子の寸法・比重が実験結果に大きな影響を及ぼすことが予想され、寸法および比重調整等による調整誤差を極力排除するためである。

ただし、海水および群落のアマモについては、水槽内での腐敗や濁りの発生防止を考慮して、人工海水・人工海草を用いた。人工海草は黒色発泡ポリエチレン製で、適度な強度および浮力を有し、波浪作用下において適度な揺動を示した。また、底質については7号硅砂 ($d_{50}=0.13\text{ mm}$, $\rho_s=2.65\text{ g/cm}^3$ (2650 kg/m^3)) を用いた。

(2) 実験条件

作用させた波浪を表-3に示す。入射波は全て規則波であり、14ケースについて実験を行った。表中の値は砂面上水深における諸元であり、事前に入射波検定を行うことでこの諸元を得た。また、Shields数は田中・SANA (1996)の理論に基づいて算定した。なお、Shields数算定に用いた底質の諸元は7号硅砂のものである。

(3) 実験方法

先述したように、種子が花穂ごと海底面に埋没することは困難であるという判断から、ここでは以下の2通りの方法で種子を設置し実験を行うこととした。

①アマモ群落外に種子を設置

②アマモ群落内に種子を設置

実験は底質を均した後、底質形状を安定させるために波を10分程度作用させ、その後種子を50粒投入し10~40分間造波させた。波を作用させた水槽内の種子や砂の挙動を観測し、造波完了後、種子の埋没個数を計測することで種子の埋没率を測定した。なお、同一ケース

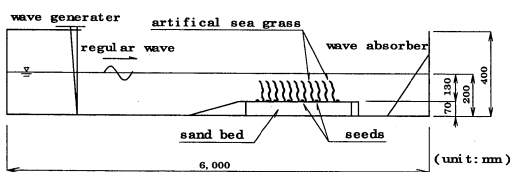


図-3 実験水槽

表-3 外力条件

H (cm)	T (s)	Shields 数	移動形態
2.73~9.90	0.60~1.20	0.107~0.502	掃流~浮遊~シートフロー

の実験を2回実施することで埋没率を評価した。

(4) 実験結果

疑似アマモ群落内および群落外に種子を設置し、水理実験を行った結果、アマモ群落内のある狭い外力条件下において種子の埋没が見られた(図-4)。なお、群落外では種子の埋没は認められなかった。

埋没した種子の様相に着目すると、人工海草基部の洗掘箇所に落下し、海草基部に固定されることによって被砂し、埋没する場合が多く見受けられた。このように、種子が何らかの要因で固定され、その上に被砂して埋没に至るという形は埋没機構②に相当する。なお、砂の移動が殆どないケース、また砂の移動が激しいケースにおいて種子の埋没は確認されなかった。

本実験では群落内においてのみ種子の埋没が見られたが、群落外においても本実験における人工海草のような効果を有するものが海底に存在すれば、種子の埋没現象は生じる可能性があると考えられる。

また、図-4より種子の埋没率と Shields 数の関係に着目すると、 $\phi=0.17$ 付近にピークをもつ分布形であり、 $\phi=0.30$ を超えるケースでは種子の埋没は見られなかった。種子埋没率が10%を超える Shields 数の範囲は0.15~0.23と狭範囲で、これは砂の移動形態が掃流移動から浮遊移動への遷移状況下において種子が埋没しやすいことを示唆している。

砂がほとんど移動しないような条件下では、種子は「被砂」することができず、また砂の移動が激しい条件下では、種子は「被砂」する前段階としての「固定」をすることができない。したがって、「被砂」と「固定」の平衡を維持できる外力条件の範囲が種子埋没の条件であり、

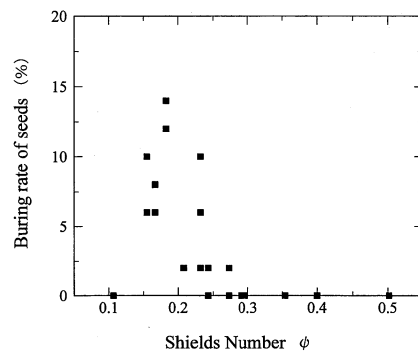


図-4 種子埋没率と Shields 数の関係

Shields 数で評価するならば $\phi=0.15\sim 0.25$ 程度であることが明らかになった。

なお、ここでは浮遊砂状態下における現象については考慮していないため、6.において埋没機構①についての考察を述べる。

6. 現地における種子埋没条件

水理実験によって得られた種子埋没条件を検証するため、種子採取場所である竹岡海岸を対象に、現地調査および数値計算を行った。

(1) 現地調査

現地において種子の埋没条件を検討するためには、埋没した種子を探索しなくてはならない。しかしながら、埋没した種子を現地で直接探索することは非常に困難であり、ここでは種子の発芽による実生体を探索することにより、実生発芽体数を種子埋没数として取り扱うこととした。実生発芽体は葉長や葉幅より多年生の株とは明らかに異なるため、海中で株数を容易にカウントすることができ、広範囲の調査が可能である。

調査領域を図-5に示す。調査はベルトトランセクト法(幅2.0m, 区画長5.0m)によって行い、発芽体が広く分布している2000年3月4日に行った。

実生発芽体の分布調査結果を図-6に示す。アマモ群落の生育密度についても併せて示している。実生発芽体は水深2.7m地点から4.7m地点付近まで約130mにわたって分布しており、水深3.2m地点から3.5m地点の間での分布が顕著であった。

実生発芽体は群落内だけではなく、群落外においても分布していた。また、種子は高波浪時の波や流れによって群落周辺に広く拡散しているものと予想されるが、実生発芽体の分布範囲は多年生株の群落分布範囲とほぼ一致していた。

(2) 数値計算

中瀬ら(1992)は本検討地点である竹岡海岸を対象に外力条件の検討を行っている。しかしながら、アマモ場

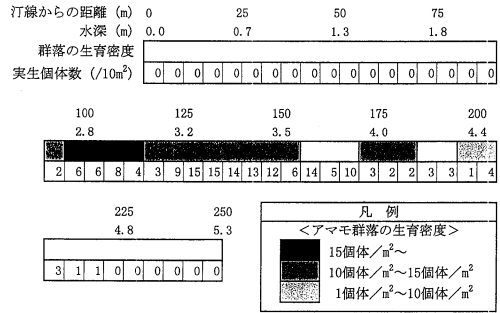


図-6 実生発芽体の分布

全体の成立条件を主眼としていたため、入射波浪を年間未超過出現確率約90%の波として有義波高1.0mを与えている。種子の埋没条件を探る上では、通常作用している波浪を対象とすることが適切であり、ここでは年間の平均有義波高0.58mおよび平均有義波周期4.9s(全国港湾海洋波浪観測:運輸省港湾局監修)を入射波浪条件として設定した。そして、波浪場及び海浜流場の解析を行い Shields 数分布を算出した。なお、Shields 数算定の際の底質諸元は現地底質の値を用いた。算出した Shields 数分布を図-7に示す。

(3) 種子埋没条件

現地調査で得られた実生発芽体の分布と数値計算によって算出した Shields 数分布とを対応させることにより、現地における種子の埋没条件を探った。その結果を図-8に示す。図中では水理実験の結果も併記している。なお、水理実験結果と現地調査結果とを対応させるため、ピーク値がほぼ重なるように設定している。

実生発芽体分布と Shields 数との関係は、水理実験における種子の埋没条件とほぼ一致しているのがわかる。現地においても水理実験と同様、 $\phi=0.15\sim 0.30$ というごく狭い範囲で実生発芽体が確認されており、掃流移動から浮遊移動への遷移状況下において種子が海底面下に埋没しやすいことがここでも明らかになった。

また、現地調査においても $\phi=0.30$ を超過する領域で

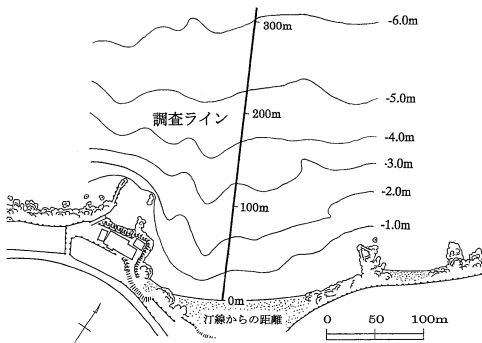


図-5 調査領域

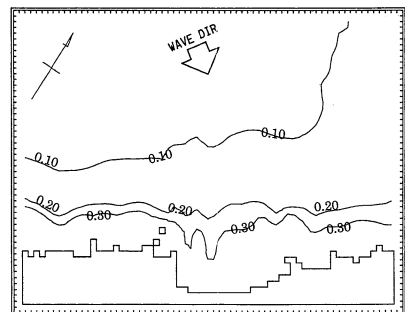


図-7 Shields 数分布

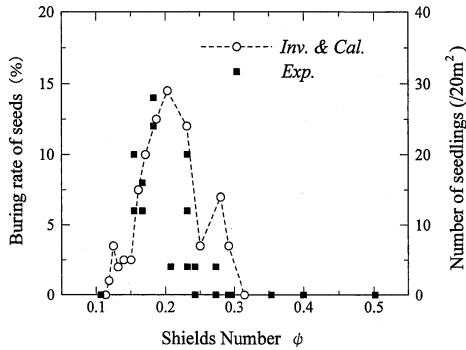


図-8 種子埋没条件

種子の埋没は見られなかった。したがって、浮遊砂状態下において埋没機構①が生じている可能性はあるものの、その割合は埋没機構②に対してさほど大きいものではなく、漂砂現象から種子の埋没条件を捉える場合、埋没機構②のみを考慮すればよいものと考えられる。

今後、アマモ場造成の適地選定を行う際には、このような埋没条件を考慮することにより、造成後のアマモ場において有性生殖による群落の維持拡大が期待できると言えよう。

ただし、発芽後の生育時において、流失等による実生発芽体の減耗が多い場合は、有性生殖による群落の維持拡大が期待できない。したがって、今後はアマモのライフサイクルや外力の季節変動等を考慮することにより、実生発芽体の生残条件について検討する必要がある。

また、本研究では入射波の諸元を年間の平均有義波を用いて設定している。これは本検討地点では波浪の季節変動があまりないためで、もし他地点において埋没条件を算定する際には種子の埋没時期を考慮し、秋期または冬期の平均有義波を用いることが望まれる。また、他地

点においてもこの埋没条件が成立するのか検証するため、今後も数多くのケースで検討を行う予定である。

7. おわりに

漂砂現象に着目し、水理実験および現地調査、数値計算によりアマモ種子の埋没機構に関する検討を行った結果、以下の主要な結論を得た。

- 1) 種子の沈降速度および摩擦抵抗は周辺底質よりも大きいことが認められた。
- 2) 種子の埋没条件は Shields 数で評価した場合、 $\phi = 0.15 \sim 0.30$ 程度であり、周辺底質の移動形態が掃流移動から浮遊移動への遷移状況下において種子が海底面下に埋没しやすいことが確認された。
- 3) この埋没条件を考慮することで、造成後のアマモ場において有性生殖による群落の維持拡大が期待できる。

参考文献

- 運輸省港湾局監修(1996): 全国港湾海洋波浪観測 25 年統計資料 (NOWPHAS 1970-1994), pp. 312-313.
- 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, 電力中央研究所報告, U14, 231 p.
- 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, No. 533/II-34, pp. 273-277.
- 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, 第 39 巻, pp. 1006-1010.
- 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, 第 46 巻, pp. 1196-1200.
- 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 回海岸工学論文集, pp. 227-231.
- 森口朗彦・高木儀昌・仲宗根琢磨・吉川浩二・團 昭紀・和泉安洋 (1999): 分布条件の異なる 2 つのアマモ場における物理環境現地観測, 水産工学研究所技報, 第 21 号, pp. 1-12.