

底質諸元および入射波浪の相違がアマモ種子の埋没条件に与える影響について

島 谷 学*・谷 口 享**・岩 本 裕 之***

不規則波及び規則波と各種底質を用いた水理実験によってアマモ種子の埋没条件を評価し、底質や入射波の相違が種子の埋没条件に与える影響について検討を行った。さらに実験で得られた種子の埋没条件の現地適応性を種子埋没期の平均有義波を用いて検証した結果、以下の結論を得た。①不規則波作用下では規則波に比べ種子が埋没しにくい、種子の埋没に適した条件は等しかった。②種子の埋没条件を種子の Shields 数で評価した場合、底質諸元に関わらず 0.03~0.07 であった。③底質の Shields 数で評価した場合、種子の埋没条件は底質諸元に依存するが、種子と底質の粒径を与えればその適性範囲を算定することが可能である。

1. はじめに

アマモは浅海砂泥域に生育する海草で、近年では港湾・海岸事業でもその保全に取り組んでいる。アマモは波や流れといった物理的外力の影響を強く受けており、アマモ場造成の際にはこれら外力に対する生育条件を明らかにする必要がある。これに関する研究は数多くあるものの、高波浪時を対象としてアマモ場全体の成立条件を評価したものがほとんどで（例えば、丸山ら, 1987；中瀬ら, 1992；森口ら, 1999）、アマモの生理生態にまで着目している例は多くない。

これに着目した研究例としては島谷ら（2000）のアマモ種子の埋没条件に関するものが挙げられる。種子が発芽するには嫌気状態に置かれることが必要で（川崎ら, 1988）、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。この埋没条件を島谷ら（2000）は実物のアマモ種子を用いた水理実験により評価しているが、単一底質、規則波のみを対象としたものであるため、現地でこの埋没条件を適用させるためにはより詳細な検討が望まれる。

そこで本研究では、不規則波及び規則波と各種底質を用いた水理実験によってアマモ種子の埋没条件を評価し、底質や入射波の相違が種子の埋没条件に与える影響について検討することを目的とした。さらに実験で得られた種子の埋没条件を現地においても適用できるか検証を行った。

2. アマモ種子の諸元

現地よりアマモの花枝を採取し、海水中で約 50 日間好気養生することでアマモの種子を摘出した。摘出した種子のうち 100 個を用いて寸法および密度を計測した結果を表-1 に示す。島谷ら（2000）の長径 3.8 mm、短径 1.8 mm、密度 1.26 g/cm³ とほぼ等しく、この種子を用いて埋

没に関する水理実験を行った。

表-1 アマモ種子の諸元

長径 (mm)	短径 (mm)	密度 (g/cm ³)
3.4	1.9	1.21

3. 水理実験

(1) 実験装置及び使用材料

水理実験は図-1 に示すような横浜国立大学水理実験棟内にある長さ 17 m、幅 0.5 m、深さ 0.55 m の二次元水槽を用いて実施した。この水槽の一端にはピストン型造波装置（三井造船株式会社製）が設置してあり、もう一端には 1/20（法尻部 1/10）の一樣斜面が設置してある。この水槽中央部にマウンドを設け、前後のマウンドで挟み込むように底質を設置し、底質内にはアマモ群落を模倣した人工海草を設置した。人工海草は発泡ポリエチレン製で地上部長さを 150 mm、設置間隔を 30 mm とした。

また、実験に用いた底質の諸元を表-2 に、粒度分布を図-2 に示す。底質の種類は 4 種類で、中央粒径 d_{50} = 0.069~0.172 mm、シルト分以下の泥分含有率 0.10~61.0%、密度 ρ_s = 2.64 g/cm³ である。

(2) 実験条件及び実験方法

入射波には規則波及び Bretschneider・光易型のスペクトル形状をもつ不規則波の 2 種類を用いた。また、島谷ら（2000）は検討パラメタとして底質の Shields 数 ϕ_{sand}

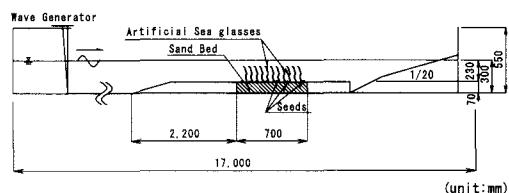


図-1 実験装置

* 正会員 博(工) 横浜国立大学助手 大学院工学研究院
** 横浜国立大学大学院
*** 正会員 五洋建設(株) 環境研究所

表-2 底質の諸元

	中央粒径 d_{50} (mm)	泥分含有率(%)
底質 A	0.069	61.0
底質 B	0.092	30.7
底質 C	0.138	14.6
底質 D	0.172	0.10

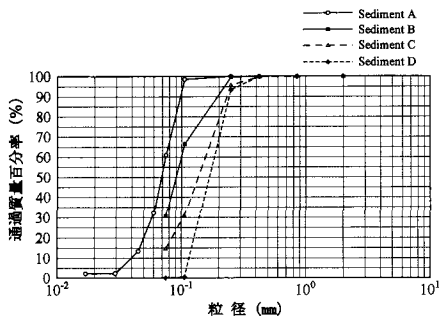


図-2 底質の粒度分布

を用いて種子の埋没条件を評価しているが、底質粒子とともに種子も流体力を受けているため、ここではこれに加え種子の Shields 数 ψ_{seed} も併せて採用した。Shields 数の算定は田中・Sana (1996) の理論に基づき、種子の Shields 数 ψ_{seed} については長径と短径の平均値 (平均粒径) を用いて算出した。実験条件を表-3、表-4 に示す。なお、入射波の周期は全ケースで 2.0 s である。

実験方法はまず底質を均した後、砂面上の任意の場所にアマモの種子を 100 粒投入し 40 分間造波させた。波浪作用下における水槽内の種子や砂の挙動を観察し、造波完了後、底面に埋没した種子の個数を計測することで

表-3 規則波実験の実験条件

	波高 H (cm)	底質の Shields 数 ψ_{sand}	種子の Shields 数 ψ_{seed}
底質 A	2.6~5.3	0.137~0.279	0.033~0.066
底質 B	1.3~5.7	0.051~0.225	0.016~0.071
底質 C	2.8~5.2	0.074~0.137	0.035~0.065
底質 D	3.3~4.3	0.070~0.091	0.041~0.054

表-4 不規則波実験の実験条件

	波高 H (cm)	底質の Shields 数 ψ_{sand}	種子の Shields 数 ψ_{seed}
底質 A	2.2~4.9	0.116~0.258	0.028~0.061
底質 B	2.5~6.3	0.099~0.248	0.031~0.079
底質 C	2.8~5.2	0.074~0.137	0.035~0.065
底質 D	2.8~5.9	0.059~0.125	0.035~0.074

種子の埋没率を測定した。ここで埋没とは種子が半分以上底質に埋まった状態を指す。なお、同一ケースの実験を 3 回実施することで埋没率を評価した。回収した種子はその後の実験にも使用したが、実験日が変わる毎に新たな種子に交換した。

(3) 実験結果と考察

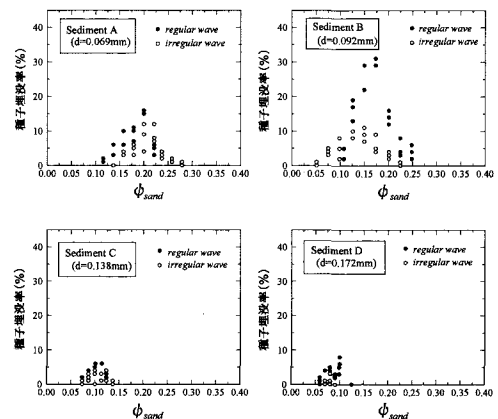
a) 種子埋没率と底質の Shields 数 ψ_{sand} との関係

種子の埋没率と底質の Shields 数 ψ_{sand} の関係を図-3 に示す。各底質とも不規則波については規則波による実験結果に比べ埋没率の絶対値が小さくなるという結果が得られた。これは、種子が砂を被り始めその後完全に底質中に埋没するまでにはある程度の時間を要するが、埋没に至るまでに大きな波が通過することで埋没し始めた種子が再び底面上に露出してしまいうためである。よって、不規則波作用下においては規則波に比べ種子が埋没しにくいメカニズムになっているものと考えられる。

しかしながら、どのような底質を用いた場合でも、ある値で埋没率がピークをとる分布形をしており、それぞれ一定の Shields 数の範囲から外れると種子の埋没が見られなくなる傾向は等しい。その種子の埋没に適した条件は入射波の種類によって変わることはなく、規則波、不規則波に関わらず同様に評価が可能であることが確認できた。

また、底質 A, B では、底質の移動形態が掃流移動下 ($0.1 < \psi_{sand} < 0.2$) において種子の埋没が見られるが、粒径の大きな底質 C, D では $\psi_{sand} = 0.1$ 付近に埋没率のピークを持つものの、埋没率は小さくなる傾向を示した。掃流移動下において種子が海底に埋没するメカニズムは種子と底質の移動抵抗の差に起因するが、底質の粒径が大きくなるとその移動抵抗に有意な差が生じなくなり、種子が埋没しにくい構造になるものと推察される。

底質 C, D について、種子の埋没が可能な Shields 数

図-3 種子埋没率と底質の Shields 数 ψ_{sand} との関係

ψ_{sand} と底質の移動限界 Shields 数 ψ_c の比較を行った。土屋 (1986) の移動限界式により底質 C, D の移動限界 Shields 数を算定したところ、それぞれ 0.087, 0.075 であった。これは種子の埋没が可能な Shields 数とほぼ等しく、底質があまり移動しないため種子埋没率が低い値を示したと考えられる。

b) 種子埋没率と種子の Shields 数 ψ_{seed} との関係

種子の埋没率と種子の Shields 数 ψ_{seed} の関係を図-4 に示す。なお、これは不規則波を用いた実験結果である。底質の諸元に関わらず、種子の埋没率がピークをとる Shields 数は 0.05 程度であり、種子の埋没に適した範囲も $0.03 < \psi_{seed} < 0.07$ と底質毎に大きな差異は見られなかった。

種子が底質中に埋没するメカニズムを観察したところ、種子が移動せずに底質のみが移動するような状況下において埋没しやすく、密度は小さいものの粒径の大きなアマモの種子は掃流力に対する抵抗力が底質よりも大きいものと考えられる。

また、 $\psi_{seed} < 0.07$ の領域で種子の埋没が見られることから、上記の埋没メカニズムを考えると種子の移動限界 Shields 数は 0.07 程度であると推察される。

c) ψ_{sand} と ψ_{seed} の関係

種子の埋没条件は底質および種子の Shields 数で評価できることは確認できた。埋没に適した種子の Shields 数 ψ_{seed} については底質の諸元に関わらず一義的に $0.03 < \psi_{seed} < 0.07$ と決めることが可能である。しかしながら、底質の Shields 数 ψ_{sand} については掃流移動下において埋没が見られることはどの底質でも等しいものの、その好適範囲については底質毎に異なる性質をもつ。

そこで、横軸に底質の Shields 数 ψ_{sand} 、縦軸に種子の Shields 数 ψ_{seed} をとり、種子埋没率を底質および種子 Shields 数の関係から示したものを図-5 に示す。円の大きさは種子の埋没率を表している。図からわかるように底質と種子の Shields 数の比は各底質毎にほぼ一定であり、原点を通る直線の傾きとして表される。この傾きは

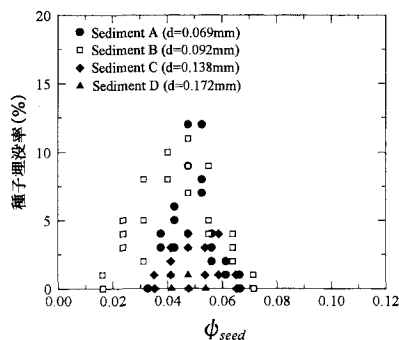


図-4 種子埋没率と種子の Shields 数 ψ_{seed} との関係

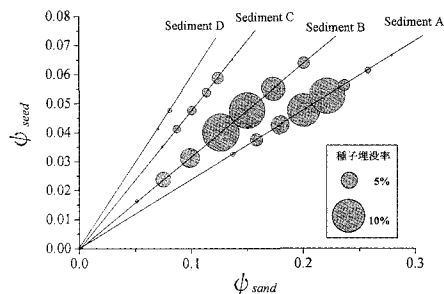


図-5 種子埋没率と $\psi_{sand} \cdot \psi_{seed}$ との関係

底質及び種子の粒径と密度に関係しており、種子と底質の密度が地点によって大きく変わらないことを前提とした場合、種子と底質の粒径によって一義的に決まるものと考えられる。図より底質と種子の Shields 数の関係を求めると、(1) 式に示すような関係として表される。

$$\psi_{sand} = \frac{0.11 d_m}{d_{50}} \psi_{seed} \dots\dots\dots (1)$$

ここで d_m は種子の平均粒径、 d_{50} は底質の中央粒径である。

種子の埋没に適した種子の Shields 数 ψ_{seed} は底質に依存せず $0.03 < \psi_{seed} < 0.07$ であるため、(1) 式中に種子と底質の粒径を代入すると、任意の底質における種子の埋没に適した ψ_{sand} の範囲を求めることが可能である。

このように、種子の埋没に適した外力条件を底質及び種子の Shields 数から評価すると、底質の粒径諸元に関わらず種子の Shields 数が $0.03 < \psi_{seed} < 0.07$ を満たし、かつ底質の移動形態が (1) 式を満たすような状況下において種子が埋没しやすいことが明らかとなった。ただし、底質の Shields 数 ψ_{sand} が移動限界 Shields 数 ψ_c と同程度である場合には種子の埋没率が著しく低下する恐れがあるので注意が必要である。

4. 現地における種子埋没条件の評価

(1) 検討地点と種子埋没率の取り扱い

水理実験による種子埋没条件を現地にて再評価するため、島谷ら (2000) にない千葉県富津市竹岡海岸を対象として検討を行った。検討地点の位置図とアマモ分布を図-6 に示す。右図の●印が繁茂期におけるアマモの生育範囲を表している。なお、この全体領域が後記する評価領域となる。

現地において種子の埋没条件を検討するには、埋没した種子を探索しなくてはならない。しかしながら、海底面に埋没した種子を現地にて直接探索することは非常に困難であることから、島谷ら (2000) は種子の発芽による実生株を探索することにより、実生株の個体数を種子埋没数として取り扱うこととしている。実際には埋没

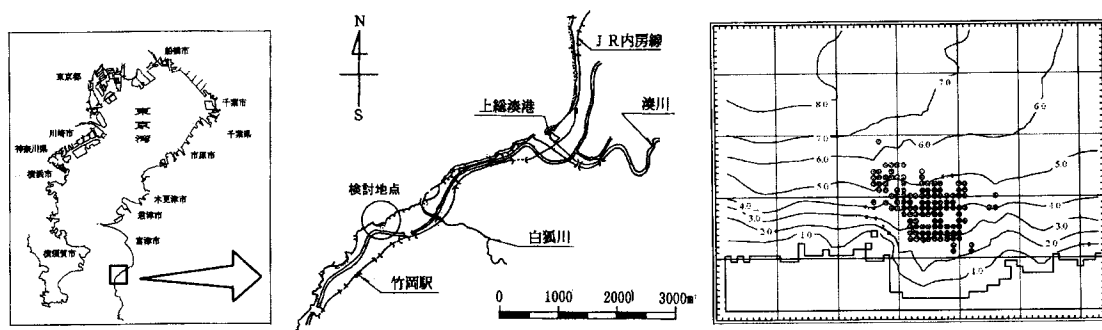


図-6 検討地点位置と当地点におけるアマモ分布

した種子が必ず発芽するとは限らないが、種子埋没数と発芽数は比例関係にあると考えられる。本研究ではこの実生株の分布を用いて検討を進めることとした。

(2) 数値解析条件

島谷ら (2000) は種子の埋没条件を評価する際に通常作用している常時波浪を対象とし、年間の平均有義波を用いて検討を行っている。しかしながら、初夏に放出された種子が海水温の低下とともに発芽するまでの間に海底面下に埋没していることが予想されるため、ここでは年間の平均有義波ではなく種子の埋没時期にあたる秋期 (9～11月) の平均有義波を用いることとした。

当検討地点近傍にある浜金谷地点のNOWPHASデータによると秋期の平均有義波は $H_{1/3}=0.54$ m, $T_{1/3}=4.9$ sである。ただし、波向については観測されていないため、検討地点からほど近い千葉県木更津のアメダス風向風速データを用いて推定した。その結果、常時作用する波浪はN方向から来襲する頻度が高いことが確認できた。

これより、当海岸と浜金谷のNOWPHAS波浪観測地点を含む領域において、入射波向をNとして、波浪観測地点において秋期の平均有義波である $H_{1/3}=0.54$ m, $T_{1/3}=4.9$ sとなるような波浪場を算定し、その時の図-6右図の評価領域における入射波条件を抽出した。その結果、評価領域での入射波の諸元として $H_{1/3}=0.47$ m, $T_{1/3}=4.9$ s, 波向NNEを得た。

この入射波条件のもとに、潮位条件をM.W.L.として波浪場、海浜流場を算定し、田中・Sana (1996) の理論に基づき波・流れ共存場における底質及び種子のShields数場の解析を行った。

なお、本検討地点において底質を採取し分析した結果、中央粒径 d_{50} は 0.18 mm, 密度は 2.65 g/cm³であった。

(3) 実生株個体数と ϕ_{sand} ・ ϕ_{seed} との関係

底質及び種子のShields数場の解析結果と島谷ら (2000) の実生株の分布を対比させることにより、水理実験によって得られた種子の埋没条件の評価を行った。そ

の結果を図-7に示す。種子のShields数 ϕ_{seed} に着目すると $0.04 < \phi_{seed} < 0.07$ の範囲で実生株の分布が見られ、水理実験で得られた種子の埋没条件 $0.03 < \phi_{seed} < 0.07$ とほぼ等しいことが確認できる。

また、底質のShields数 ϕ_{sand} に着目すると、 $0.06 < \phi_{sand} < 0.16$ の範囲で実生株の分布が見られた。これは水理実験と同様、現地においても底質の移動形態が掃流状態で種子が埋没しやすいことを示唆している。また、当検討地点の種子の平均粒径と底質の中央粒径から (1) 式より種子の埋没に適したShields数を算定した結果、 $0.05 < \phi_{sand} < 0.12$ であった。これは現地で実生株が見られたShields数の範囲とほぼ等しく、現地において種子の埋没条件を再評価することで水理実験で得られた成果を検証することができた。

また、今回の検討では入射波として種子の埋没期にあたる秋期 (9～11月) の平均有義波を用いたが、この波浪諸元を用いることにより現地での種子埋没条件を評価することが可能であることも確認できた。

島谷ら (2000) は底質のShields数を評価パラメタとして単一底質を用いて種子の埋没条件を評価したが、種子の埋没条件は底質のShields数だけでなく種子のShields数にも関係し、また埋没に適した底質のShields数は底質毎に異なることを本研究では明らかにした。ま

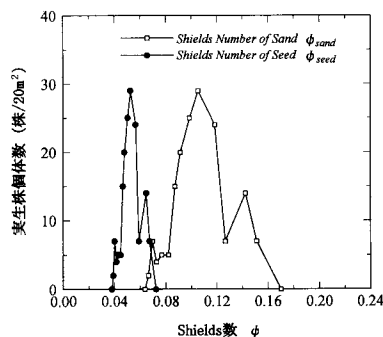


図-7 実生株個体数と底質・種子のShields数の関係

た、底質の Shields 数の適性範囲は種子と底質の粒径に関係し、種子の Shields 数の適性範囲を考慮することで算定が可能であることも確認できた。

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る。

5. ま と め

不規則波及び規則波と各種底質を用いた水理実験によってアマモ種子の埋没条件を評価し、底質や入射波の相違が種子の埋没条件に与える影響について検討を行った。さらに実験で得られた種子の埋没条件を現地においても適用できるか、種子埋没期（秋期）における平均有義波を検討波浪として検証を行った結果、以下の主要な結論を得た。

- ・不規則波作用下においては規則波に比べ種子が埋没しにくいメカニズムになっているが、種子の埋没に適した条件は入射波の種類によって変わることはなく、規則波、不規則波に関わらず同様に評価が可能である。
- ・種子の埋没条件を種子の Shield 数 ψ_{seed} で評価した場合、底質の諸元に関わらず $0.03 < \psi_{seed} < 0.07$ であった。

- ・底質の Shields 数 ψ_{sand} で評価した場合、種子の埋没条件は底質の諸元に依存するが、種子と底質の粒径を与えればその適性範囲を算定することが可能である。
- ・種子の埋没条件を評価するには上記2つのパラメータを用い、双方が埋没条件を満たす必要がある。これら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

- 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.
- 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, 第 47 巻, pp. 1171-1175.
- 土屋義人 (1986): 漂砂量則について, 第 22 回水工学に関する夏期研修会講義集, B コース, pp. B-4-1-B-4-22.
- 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.
- 丸山康樹・五十嵐由雄・石川雄介 (1987): アマモ場適地選定手法, 海岸工学論文集, 第 34 巻, 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.