

参考資料 1

砕石効果の理論的な検討

砕石効果の論理的な検証は桑原（2009）によって行われており、以下はその文献に準じて説明する。

1.1 波・流れ共存場のシールズ数 θ_{wc}

波によるシールズ数 θ_w

波浪環境下における海底面での 波による底質の移動のしやすさを示す シールズ数 θ_w 、波による底面せん断応力 τ_w (N/m²)、摩擦速度 u_w^* (m/s)は、微小振幅波理論により次式で求まる。

$$\theta_w = \frac{u_w^{*2}}{(\rho_{d50}/\rho - 1)gd_{50}} = \frac{\tau_w}{(\rho_{d50} - \rho)gd_{50}} \quad (1)$$

$$\tau_w = \rho u_w^{*2} \quad (2)$$

$$u_w^* = \sqrt{\frac{1}{2} f_w U_m^2} \quad (3)$$

$$U_m = A \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

$$A = \frac{H}{2} \frac{1}{\sinh(2\pi h/L)} \quad (5)$$

$$f_w = \exp \left[5.213 \left(\frac{k_s}{A} \right)^{0.194} - 5.977 \right] \quad (6)$$

ここで、 ρ_{d50} ：底質粒子の密度(kg/m³)、 ρ ：海水の密度(kg/m³)、 g ：重力加速度(m/s²)、 d_{50} ：底質の中央粒径(m)、 U_m ：底面波浪流速(m/s)、 H ：波高(m)、 L ：波長(m)、 T ：波の周期(s)、 h ：水深(m)、 f_w ：波に対する摩擦係数、 k_s ：相当粗度(m)である。：相当係数 k_s （本手引きでは $2.5d_{50}$ を使用している）。

流れによるシールズ数 θ_c

流れによる底質の移動のしやすさを示すシールズ数 θ_c 、流れによる底面のせん断応力 τ_c (N/m²)、摩擦速度 u_c^* (m/s)は、次式より求まる。

$$\theta_c = \frac{u_c^{*2}}{(\rho_{d50}/\rho - 1)gd_{50}} = \frac{\tau_c}{(\rho_{d50} - \rho)gd_{50}} \quad (7)$$

$$\tau_c = \rho u_c^{*2} \quad (8)$$

$$u_c^* = \sqrt{\frac{1}{2} f_c U_c^2} \quad (9)$$

$$f_c = \frac{0.06}{(\log(12h/k_s))^2} \quad (10)$$

ここで、 U_c :流れの流速(m/s)、 f_c :流れに対する摩擦係数である。

それぞれ求めた波および流れの成分は、次式により合成され、底質の安定性の指標となる 波・流れ共存場のシールズ数 θ_{wc} 、底面のせん断応力 τ_{wc} (N/m²)、摩擦速度 u_{wc}^* (m/s)が求まる。

$$\theta_{wc} = \sqrt{\theta_w^2 + \theta_c^2} \quad (11)$$

$$\tau_{wc} = \sqrt{\tau_w^2 + \tau_c^2} \quad (12)$$

$$u_{wc}^* = \sqrt[4]{u_w^{*4} + u_c^{*4}} \quad (13)$$

1.2 アサリ稚貝の限界シールズ数(θ_{cr})

まず、対象地点における底質の平均的な特性を用いて、底質の粒子レイノルズ数 Re を計算する。

$$Re = \frac{d_s \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_s}}{\nu} \quad (14)$$

ここで、 d_s :底質の粒径 (アサリ殻長) (m)、 ρ_s :底質の密度 (アサリ個体自身の密度)

(kg/m³)、 ν :動粘性係数(m²/s)である。この粒子レイノルズ数を用いると、次式により底質の移動限界シールズ数 θ_{cr} が求まる。

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0.24(Re^{2/3})^{-1} & Re^{2/3} < 4 \\ 0.14(Re^{2/3})^{-0.64} & 4 \leq Re^{2/3} < 10 \\ 0.04(Re^{2/3})^{-0.1} & 10 \leq Re^{2/3} < 20 \\ 0.013(Re^{2/3})^{0.29} & 20 \leq Re^{2/3} < 150 \\ 0.055 & 150 \leq Re^{2/3} \end{cases} \quad (15)$$

アサリ稚貝と底質の粒径が異なる場合($d_s \neq d_{50}$)は、遮蔽・露出効果を考慮する必要があるため修正係数 ξ により限界シールズ数を修正する。

$$\theta'_{cr} = \xi \theta_{cr} \quad (16)$$

$$\xi = \frac{1.66667}{\left[\log\left(\frac{19d_s}{d_{50}}\right)\right]^2} \quad (17)$$

この限界シールズ数 θ'_{cr} を用いて、アサリの限界摩擦速度 u_{cr}^* (m/s)は、次式により求められる。この値は、アサリ稚貝が停止から掃流移動（底質上を転がりながら移動する）を開始する限界を示している。

$$u_{cr}^* = \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_s\theta'_{cr}} \quad (18)$$

$$\frac{w}{\sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_s}} = \begin{cases} Re/18 & 1\mu m < d_s \leq 100\mu m \\ (\sqrt{1 + 0.01Re^2} - 1)10/Re & 100\mu m < d_s < 1000\mu m \\ 1.1 & 1000\mu m \leq d_s \end{cases} \quad (19)$$

アサリ稚貝の移動モードは、上で求めた波・流れ共存場の摩擦速度 u_{wc}^* とアサリ稚貝の限界摩擦速度 u_{cr}^* および沈降速度 w との関係から移動モードを示すことができる。すなわち、 $u_{wc}^* \leq u_{cr}^*$ の場合、アサリ稚貝はその場で停止する。 $u_{cr}^* < u_{wc}^* \leq w$ の場合は掃流移動し、 $w < \theta_{wc}$ の場合には浮遊移動する。底質の移動モードの評価も同様である。一般的な目安として、波・流れ共存場のシールズ数 θ_{wc} が 0.043 未満ではアサリ稚貝（底質）は移動しないが、0.043～0.06 で掃流移動となり、0.1 以上で浮遊移動となることが知られている（Shibayama et al. 1982）。本手引きでは、碎石敷設を行った場合に $\theta_{wc} < 0.1$ となる海域を適地選定の目安としている（8章、参考資料3、参照）。

波・流れ共存場におけるアサリ稚貝や底質の移動限界は、アサリ稚貝や底質の粒径に依存することが示され（式（18））、例えば天然漁場の中央粒径の小さな底質ではアサリ稚貝が動かされる波浪環境であっても、中央粒径が大きい砕石を敷設すれば、アサリ稚貝は動かされにくくなり、アサリ定位性が増すことが期待される。

図 1.2-1 に底質を、砂質（中央粒径 d_{50} 0.3 mm）または 7 号砕石（粒径 2.5～5.0 mm、中央粒径 $d_{50} = 3.75$ mm）を仮定した場合の、底面波浪流速 U_m （横軸）と波・流れ共存場のシールズ数 θ_{wc} および底質の限界シールズ数 θ_{cr} （縦軸）の関係を示す。底面波浪流速 U_m が大きくなるにつれて θ_{wc} も大きくなり、 θ_{cr} を超えたときの底面波浪流速 U_m が底質の移動限界流速である。図より、砂質の移動限界となる U_m は約 0.14 m/s であるのに対し、7 号砕石の場合は約 0.42 m/s であるため、7 号砕石は砂質より動かされにくいことが分かる。なお、ここでは簡単のため、 θ_{wc} を算出するにあたり、 θ_c をゼロとした。また、佐藤ほか（2020）に基づき、波浪周期 T を 6s、海水密度 ρ 及び底質密度 ρ_{d50} を 1025kg/m³、2650kg/m³、相当粗度 k_s を 2.5 d_{50} m、重力加速度 g を 9.81m/s²、動粘性係数 ν を 1.0×10⁻⁶m²/s として計算した。

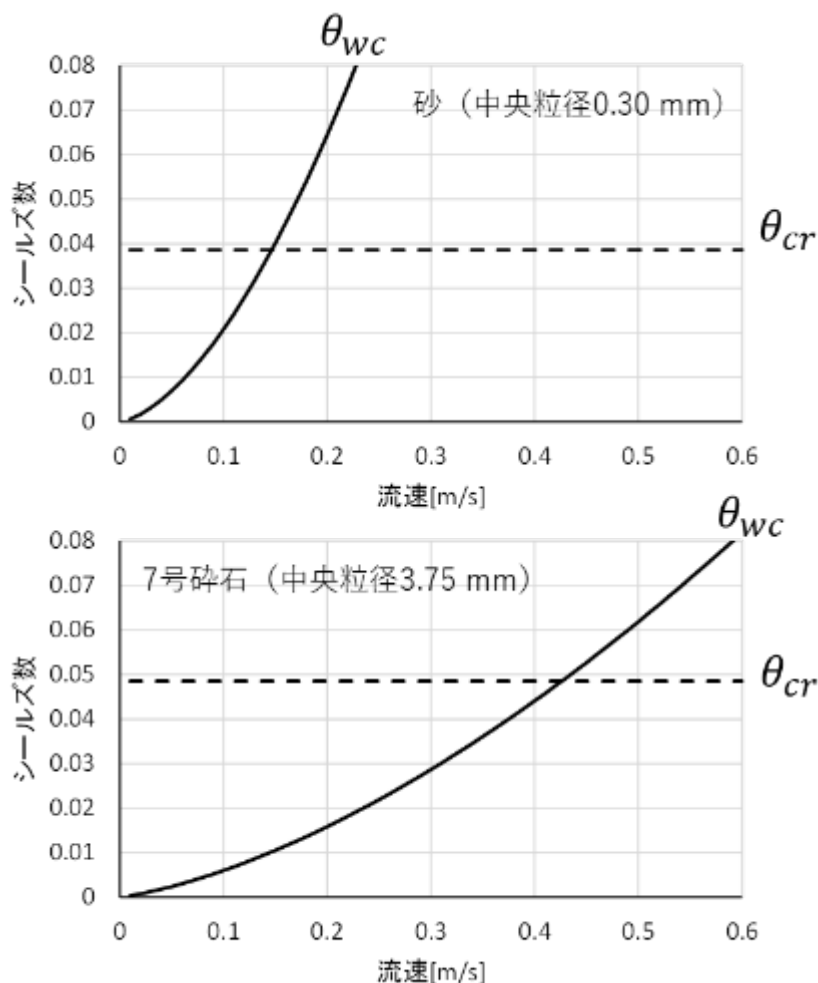


図 1.2-1: 移動限界判定図

参考資料 2

室内実験による波浪に対する碎石のアサリ定位効果の検証

砕石材と稚貝サイズの違いによる保護効果の詳細については室内実験により佐藤ほか(2020)により詳しく検証されており、以下はその文献に準じて説明する。

2.1 実験方法

振動流水槽 (図 2.1-1; 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 神栖庁舎 保有) は、内部にプロペラ式の流れ発生装置があり、目視可能エリア (水路長約 12 m、水路幅約 0.5 m、水深約 0.5 m) で観測を行うことができる (図 2.1-2)。目視可能エリア内に、実験設備を図 2.1-3 のように



図: 2.1-1 振動流水槽

設置した。実験の観測区間は振動流水槽の中央 2 m となる。観測区間での偏流を防ぐため、観測区間を含めて長さ 6 m、高さ 15 cm で水路床に碎石を敷設した。また、碎石敷設区間の左右に勾配 1/10 の斜壁を設置した。

実験条件は、アサリの殻長、振動流速、砕石粒径、水温を組み合わせ実施した (表 2.1-1)。実験のイメージを図 2.1-4 に示す。ここで、実験における定位とは、観測区間内にアサリが振動流に流されず留まった状態とし、定位状態の個体の割合を定位率と定義した。

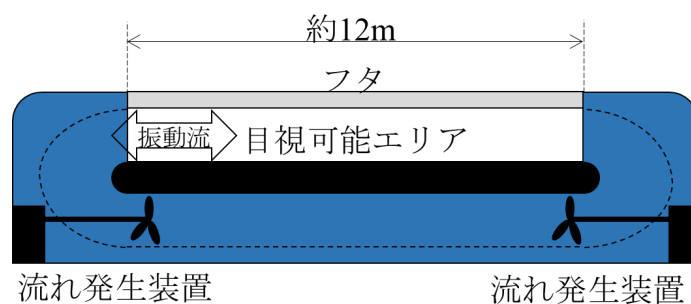


図: 2.1-2: 振動流水槽断面の概略図

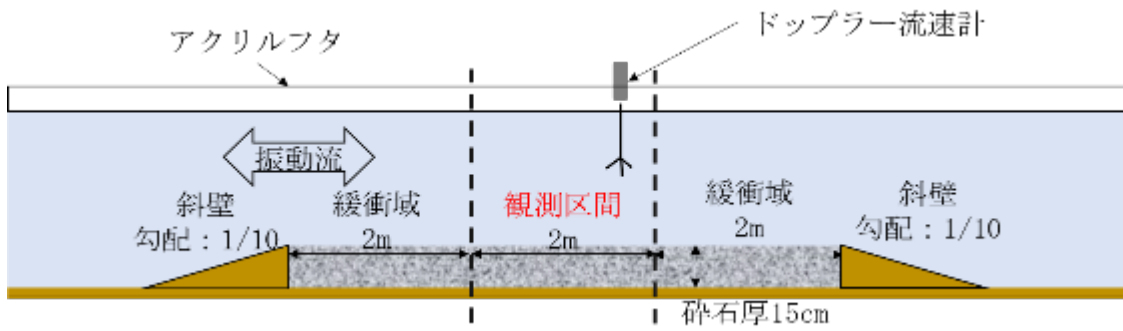


図 2.1-3: 目視可能エリアにおける実験設備の概略図

表 2.1-1: 実験条件

アサリ殻長 [mm] (2 mm毎にグループ分けした)	振動流速 [m/s]	砕石粒径	水温
4 ~ 6	0.2 0.3 0.4 0.5 0.6	7号砕石 (2.5~5.0 mm) 6号砕石 (5.0~13.0 mm)	夏期条件 (約23°C) 冬期条件 (約13°C)
6 ~ 8			
8 ~ 10			
10 ~ 12			
12 ~ 14			
14 ~ 16			
16 ~ 18			
18 ~ 20			
20 ~ 22			

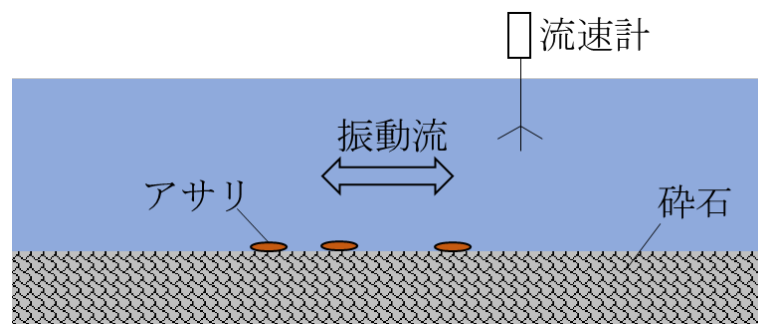


図 2.1-4: 実験のイメージ

2.2 アサリ殻長と流速の関係

7号砕石（粒径2.5～5.0mm）、水温約23℃の条件下において、流速0.3m/sの環境下では、どの殻長のアサリも定位率0.8を超えることから、砕石敷設によってアサリ定着の安定性が向上することが確認された（図:2.2-1）。図中の理論値の推定曲線は、後述する理論式による値である。内湾での最大波浪流速に相当する0.6m/sの環境下においては、殻長4～10mmのアサリの定位率は0.8を超え、殻長が小さいほど定位率が高くなることが確認された。殻長10mmを超えるアサリでも同様の傾向がみられ、殻長20～22mmになると定位率が0.3以下まで低下することが確認された。なお、7号砕石、水温13℃の条件下でも、同様の結果が得られている（図:2.2-2）。

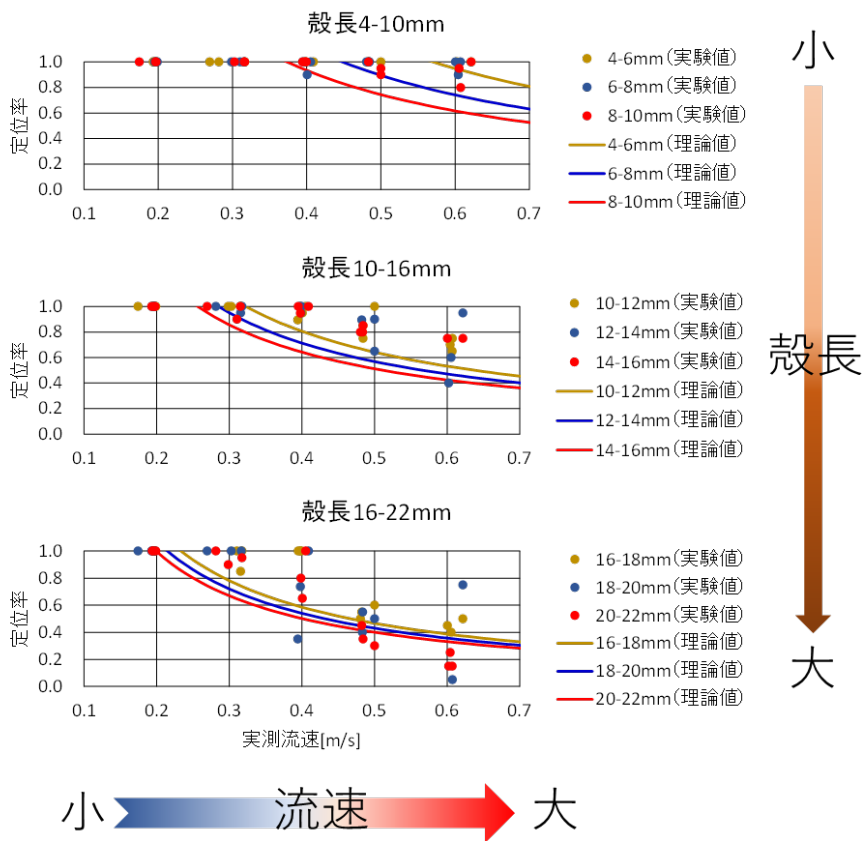


図 2.2-1: 基質が7号砕石、水温が約23℃の条件下での実験結果

6号砕石（粒径5～13mm）、水温約13℃の条件下において、7号砕石と比較して定位率は上昇し、流速0.6 m/sを超える環境下においても、殻長20～22mmのアサリの定位率は0.5を超えていた（図2.2-3）。なお、実験で発生させた最大流速0.6 m/sでも、7号砕石および6号砕石が、地形を変化させるほど動かされることはなかった。これらの結果から、砕石敷設により内湾で最も厳しい波浪環境下でも基質の安定性を向上させることができ、それに伴い、殻長が小さい個体ほど定位効果が大きくなることが明らかとなった。

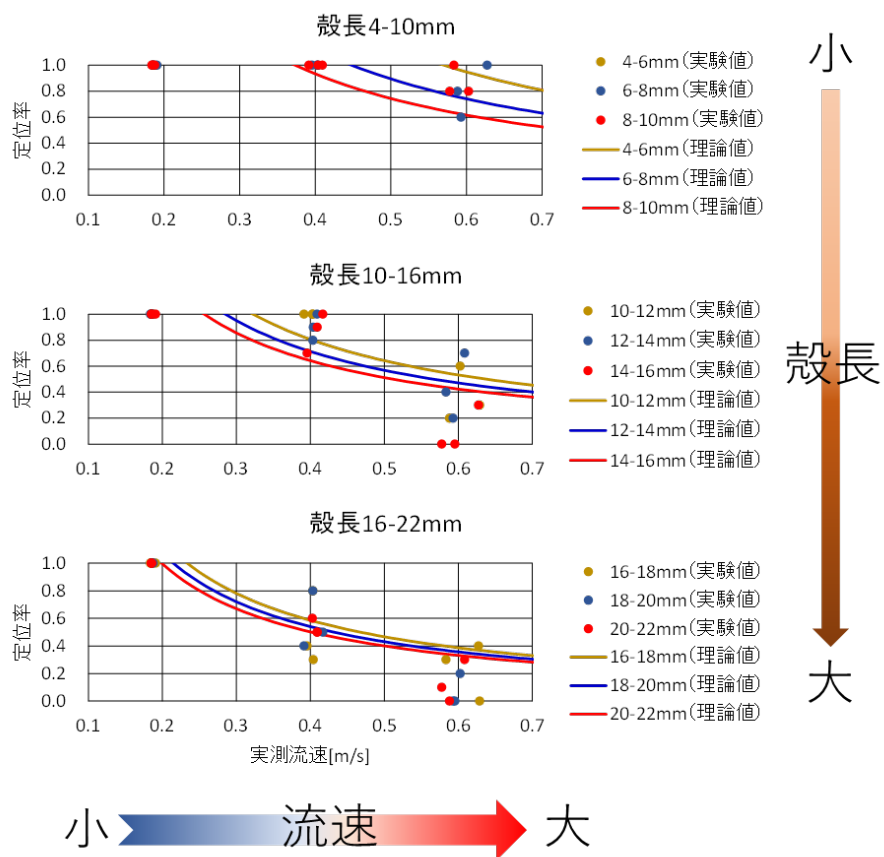


図 2.2-2: 基質が 7 号砕石、水温が約 13 °C の条件下での実験結果

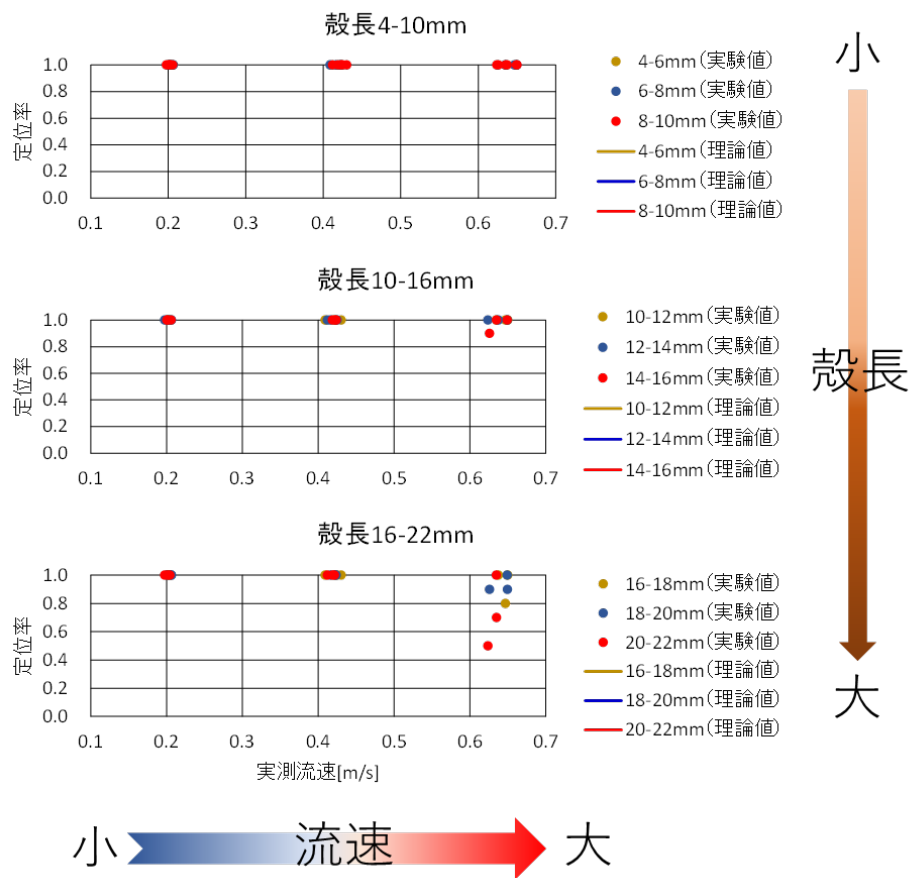


図 2.2-3: 基質が 6 号碎石，水温が約 13°C の条件下での実験結果

2.3 碎石敷設によるアサリ定位のメカニズム

碎石の上のアサリの定位率は、殻長に応じて異なることが明らかとなった。殻長 10 mm までのアサリは碎石の間隙に入ることによって定位する。一方、殻長 10 mm を超えるアサリでは、間隙に入ることができないため、振動流の往復が切り替わり流速が低下したときに斧足を伸ばし、潜砂行動することで定位することが観察された (図 2.3-1)。

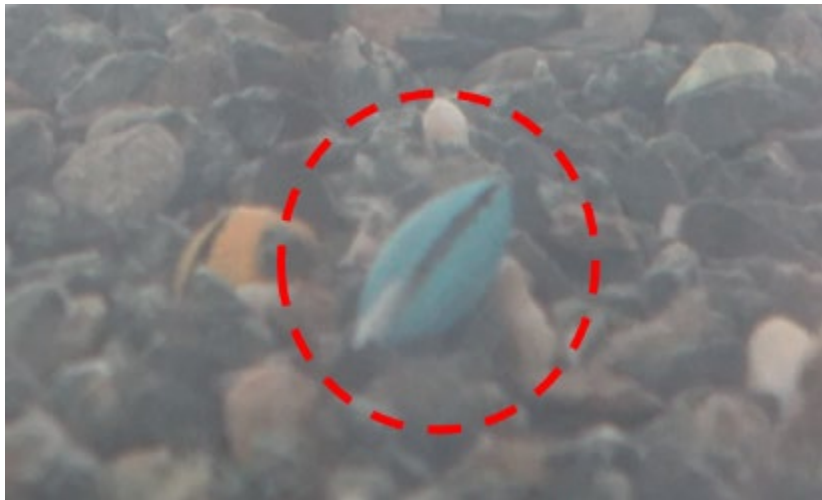


図 2.3-1: 斧足を伸ばしたアサリ（点線赤丸部分）

2.4 砕石敷設によるアサリ定位率の理論式

振動流による底質の移動のしやすさを示すシールズ数 θ_{wc} が底質の移動限界シールズ数 θ_{cr} を超えたときの流速が、底質の移動限界流速となる。すなわち、下記の条件となったとき、底質の移動限界流速を超えているということである。

$$\frac{\theta_{cr}}{\theta_{wc}} < 1$$

この関係式を用いて、砕石上でのアサリの定位率 p は下記のとおりとなる。

$$p = \begin{cases} 1 & , \xi \frac{\theta_{cr}}{\theta_{wc}} \geq 1 \\ \left(\xi \frac{\theta_{cr}}{\theta_{wc}} \right)^c & , \xi \frac{\theta_{cr}}{\theta_{wc}} < 1 \end{cases}$$

ここで、 ξ : アサリのシールズ数を表すための修正係数、 c : 実験定数である。実験定数は、「2.2 アサリ殻長と流速の関係」で述べた実験結果から求める。修正係数は、底質の中央粒径とアサリの殻長が異なる場合を考慮し、アサリの比重が底質の比重より小さいことも考慮する必要がある。そこで、修正係数を下記のとおり定義する。

$$\xi = \left(\frac{\rho_s / \rho - 1}{\rho_{d50} / \rho - 1} \right)^{a'} \left(\frac{d_s}{d_{50}} \right)^{b'}$$

ここで、 ρ_s :アサリの密度、 d_s :アサリの殻長、 a' 、 b' :実験定数である。ここでは、 ρ 、 ρ_s 、 ρ_{d50} を一定値として、 $\xi \frac{\theta_{cr}}{\theta_{wc}} < 1$ の場合の定位率 p の式を整理すると、下記のとおりとなる。

$$p = \left(\xi \frac{\theta_{cr}}{\theta_{wc}} \right)^c = \exp(a) \left(\frac{d_s}{d_{50}} \right)^b \left(\frac{\theta_{cr}}{\theta_{wc}} \right)^c$$

実験定数 a 、 b 、 c は、2.2の実験結果から最小二乗法により、表 2.4-1 に示した値となった。これらの実験定数を用いて推定した定位率 p が、図 2.2-1~3 に示した理論値である。

定位率 p の計算をするにあたり設定したパラメータを表 2.4-2 に示している。波の周期(s) 底面波浪流速 U_m は、図 2.1-3 で示しているドップラー流速計で計測された実測流速を用いた。ここで、式(5)の H : 波高(m)、 L : 波長(m)、 h : 水深(m)は、 U_m が直接測定できるので、設定する必要はない。底質の中央粒径 d_{50} は、7号砕石の場合は3.75 mm、6号砕石の場合は9 mmとして計算した。アサリの中央粒径 d_s は各グループの中央殻長（たとえば、殻長4~6 mmのグループの場合は、5 mm）とした。この実験では、波・流れのうち、流れは作用しないので、 θ_c はゼロとしている。すなわち、 $\theta_{wc} = \theta_w$ である。

表 2.4-1:
実験定数

実験定数	値
a	0.5095
b	-0.7326
c	0.6706

表 2.4-2: パラメータ

パラメータ	記号	値	単位
重力加速度	g	9.81	m/s ²
動粘性係数	ν	1.0×10^{-6}	m ² /s
海水密度	ρ	1025	kg/m ³
砕石密度	ρ_{d50}	2650	kg/m ³
相当粗度	k_s	$2.5d_{50}$	m
波の周期	T	6	s

参考資料 3

東京湾 船橋地区における適地選定

8章では、主に現地観測とそれに基づくモデル推定に阻害要因の分布を把握し適地選定を行った伊勢湾 松阪地区の例を示したが、ここでは主に文献情報に基づいて適地選定を行った東京湾 船橋地区の例を示す。

① 資源量調査によるアサリの分布の把握

千葉県では、1986年以降、貝類資源量調査が行われており、船橋地区のアサリ資源量についても調査されている。この調査に基づけば、船橋地区では毎年、稚貝の着底は観察されており、殻長 30 mm 以上の漁獲サイズでは、最大で 50 個体/m²の資源密度が観察されている。

② アサリ生残・成長の阻害要因の抽出

東京湾における近年の生残・成長に対する阻害要因として、1. 波・流れによる生残率の低下、2. 河川出水による塩分低下あるいは被泥による生残率の低下、3. 貧酸素水塊による生残率の低下、4. 食害等があげられている（鳥羽 2017）。ここでは、船橋地区の海域を例に、碎石敷設の適地選定を行うこととし、アサリ生残・成長の阻害要因 1~3 に注目して敷設エリアを絞り込んでいくこととする。

③ 阻害要因ごとの分布の把握

1. 波・流れによる生残率の低下

アサリが波浪により生残に不適切な海域に移動させられることにより、生残率は低下する。波浪による移動または定位については、波・流れによる底質の移動しやすさを示す無次元量である波・流れ共存場のシールズ数 θ_{wc} が指標となる。シールズ数の計算は、まず、波浪場の数値計算より底面波浪流速 U_m 等を算出し、7号碎石を敷設することとして参考資料1の数式より求めた。

波浪場の数値計算では、対象とする船橋地区に東西 6,890 m×南北 5,570 m（格子数 100×100）の領域を設定し、沖側からの入射波は、波高（H）を 1 m、周期（T）を 5 秒、真南からの波（ $\theta = 180$ 度、nautical）を仮定し、水位は朔望平均満潮面（HWL）として計算した。海底地形は震災時に地盤の沈下が見られたことから、地形は震災後のもの（千葉県により H24 年に測定）を用いた。また、ここでは、流れの影響は少ないものと考え、波浪場のみを delft3d-open source (<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>) を用いて解析した。当海域の底質は 0.3 mm 程度であるが、これを 7 号砕石（中央粒径 $d_{50} = 3.0$ mm; 底質粒子の比重 $\rho_{d50} = 2,650$ kg/m）に変更することとし、底質の安定性を評価するシーلز数を算出した。シーلز数が小さいと底質は安定であり、大きいほど不安定であると言える。一般的な目安として、シーلز数が 0.1 以上で浮遊移動することが知られている（Shibayama et al. 1982）。

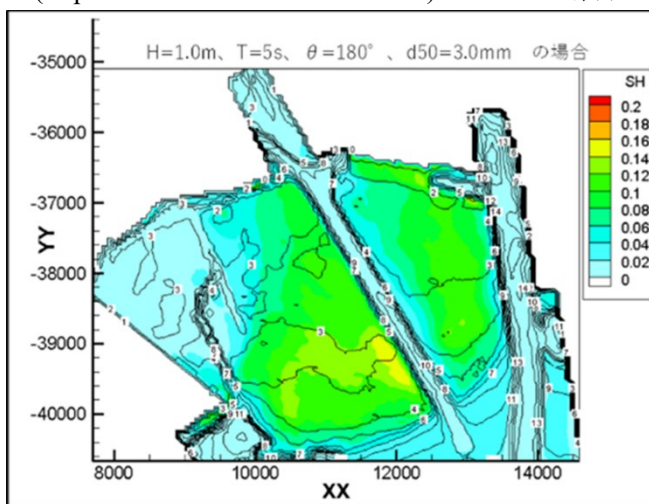


図 3-1: 船橋地区へ 7 号砕石敷設を行った場合のシーلز数値

図 3-1 からは、緑～赤色の領域は、7 号砕石の敷設を行った場合に、波浪によって砕石が移動する可能性が高い海域である。砕石敷設の効果を得る場合、まずこの海域（図 3-2）を避ける必要がある。

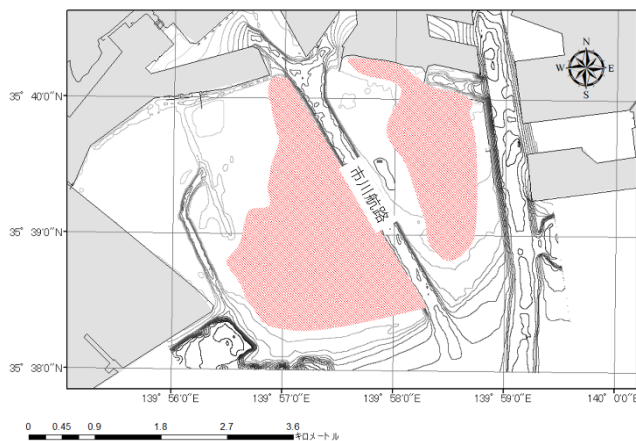


図 3-2: シールズ数からみた敷設不適合エリア

2. 河川出水による塩分低下あるいは被泥による生残率の低下

台風通過などに伴う大量降雨によって河川水が氾濫し、泥濁水が河口域の漁場に流出することを出水という。出水時には漁場の塩分濃度が低下し、流出した浮泥の漁場への堆積が起こる。出水による塩分低下および浮泥の堆積域でアサリのへい死が発生する。既存の文献情報等から出水時の塩分低下や浮泥堆積の情報が得られた場合、堆積やそれによる死亡が起こりやすい海域を避ける。

船橋地区では、柿野ほか

(1984) により、1982年に千葉北部地区で出水が発生した時のアサリの生残率が推定されており

(図3-3)、この結果から沖側で生残率は大きいものの、岸側、特に市川航路西側の岸側では生残率が低いことがわかり、この海域(図3-4)をなるべく避ける必要がある。

3. 貧酸素水塊による生残率の低下

青潮または貧酸素水塊の発生によるアサリ大量斃死が起こることが知られている。既存文献や、近年の貧酸素水塊の発生状況をインターネット等を活用して確認し、青潮または貧酸素水塊の発生しやすい海域を避ける。

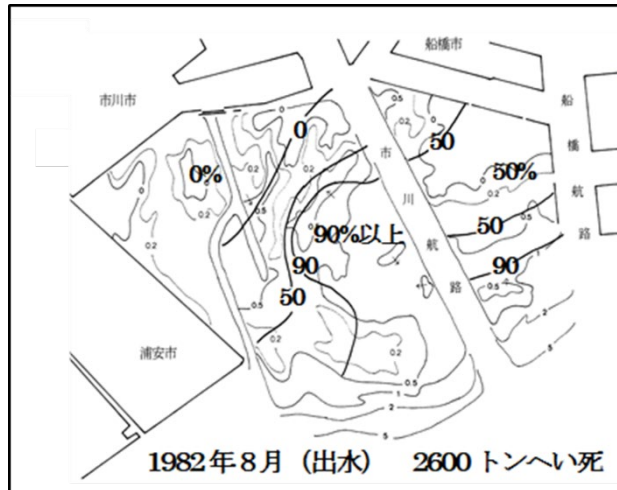


図3-3: 取水時の生残率 (柿野ほか 1984 改変)

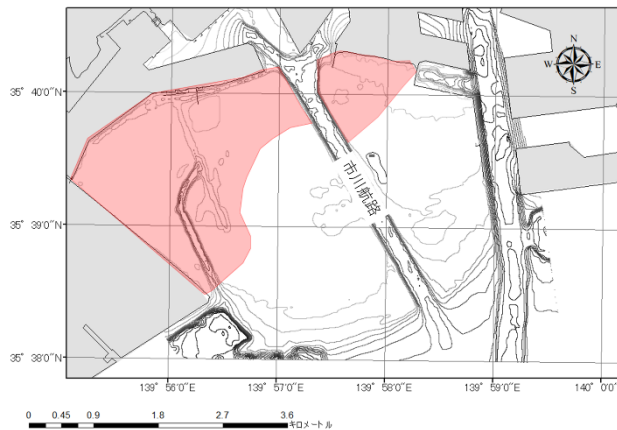


図3-4: 取水時の生残率からみた敷設不適合エリア

船橋地区では、柿野・鳥羽（1990）により、1985・86年、に千葉北部地区で青潮（貧酸素水塊）が発生した時のアサリの生残率が推定されており（図3-5）、この結果から、市川航路西側で特に生残率が低いことがわかり、この海域（図3-6）をなるべく避ける必要がある。

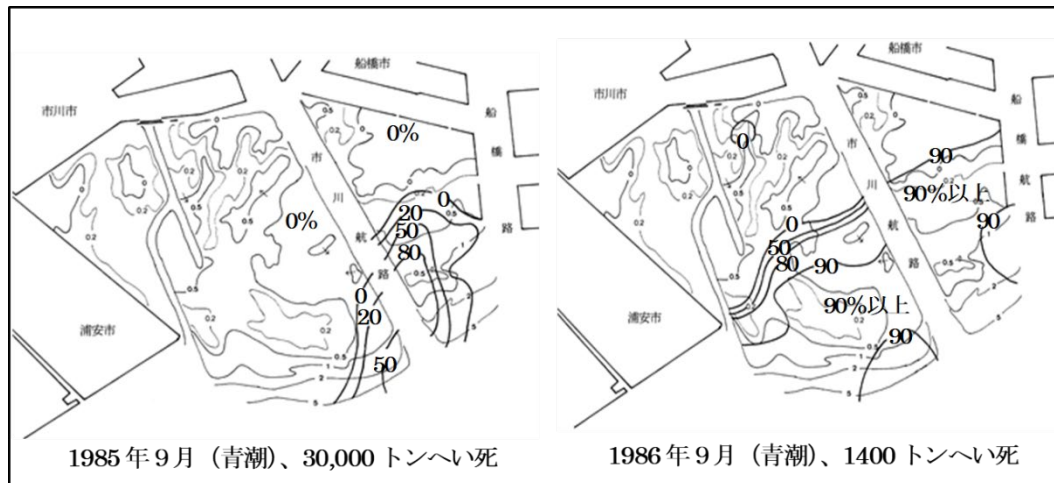


図3-5: 青潮（貧酸素水塊）発生時の生残率（柿野・鳥羽 1990 を改変）

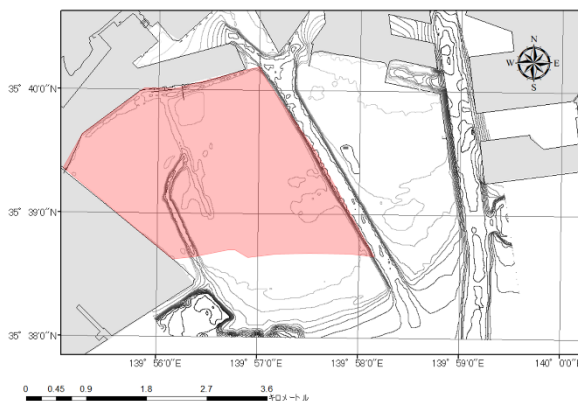


図3-6: 青潮発生時の生残率からみた敷設不適合エリア

④ 重ね合わせによる適地の選定

砕石敷設の効果を期待する場合、まずはシールズ数の大きい海域（図3-2）を避けることが重要である。そのうえで、出水（図3-4）、貧酸素（図3-6）などのアサリ生存を低下させる要因のある海域をなるべく避ける必要がある。これらアサリ生存に負の要素がある海域3図を重ね合わせたものが図3-7である。砕石敷設の効果が低い赤斜線部をまず避け、アサリ生存への負の要素が少ない白色または赤色の薄い海域が、順に適地として選定される。ただし適地選定には海域を利用する漁業者および関係各位の要望を十分考

慮する。船橋地区の場合、これらの検討をもとに適地選定し、R2年に碎石敷設を行っている。

これらと合わせて、食害生物の分布情報が得られる場合は、その分布密度が高い海域を避ける。さらに、碎石区への砂等の堆積により、碎石の持つアサリ保護機能の低下が生じることが考えられる（11章、参照）。敷設後の維持・管理を考える場合、底質の移動が少ない海域を選択すれば、碎石の保護効果の持続が容易となる。

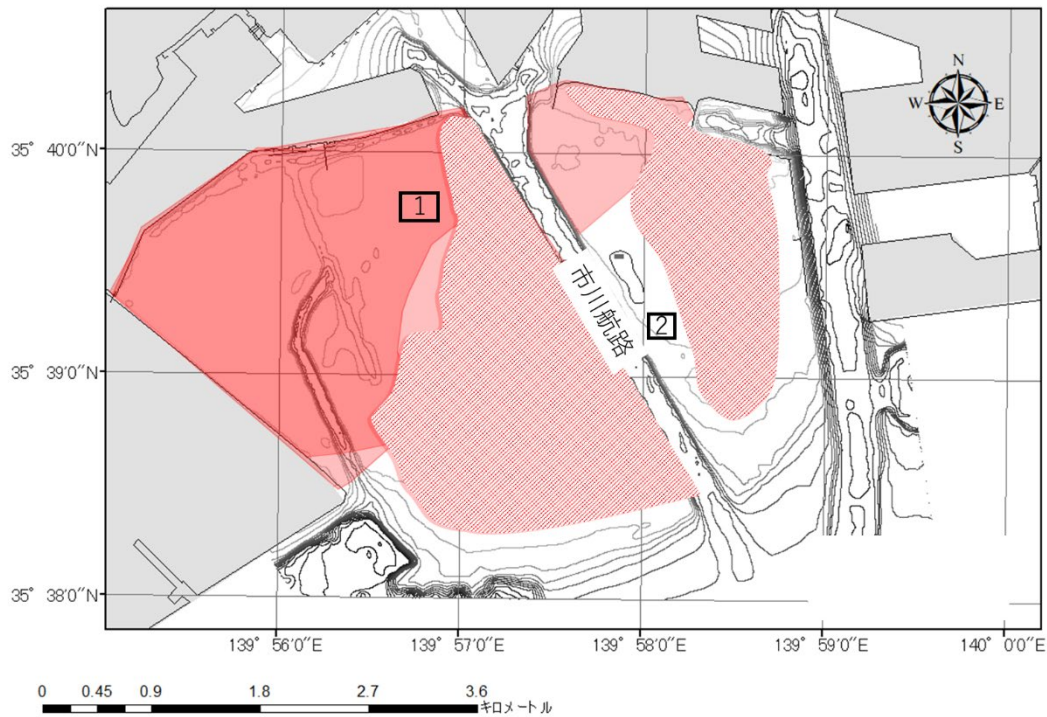


図 3-7: 敷設不適合エリアの重ね合わせによる適地選定

1: H29-30 碎石敷設、2: R2 碎石敷設