

海藻幼胚(種子)の拡散予測と現地観測

杜 多 哲*・飯 倉 敏 弘**・北 村 章 二***

1. 緒 論

藻場を造成するために既存の藻場の周辺に自然石やコンクリートブロック等の付着基盤を投入し、藻場から拡散する幼胚(種子)を着生させる手法がよく用いられる。本論文では流れの測定結果から幼胚の着底数密度分布を予測する手法を提案し、現地観測より得られた海藻(アカモク)幼胚の分布と比較する。

2. ホンダワラ類幼胚の放出様式と現象の単純化

幼胚とは母藻から産出された卵が母藻上で受精し直ちに分裂を始めたもので、一定期間母藻上に留まった後、海底の基盤に付着するための仮根が伸長を始める頃に母藻から離れ、流れによって拡散しつつ沈降する。基盤上に着底した幼胚は付着力が弱く、わずかな水の流動によって移動させられるが、一定期間、同じ場所に留まる間に、仮根からの分泌物によってしっかりと着生する。

幼胚の拡散を問題とする場合、放出源である藻場の広がり、放出部の鉛直的な分布が問題となるが、これらを同時に測定した例はない。そこで本論文では現象を単純化し藻場中心の一定の高さから、 δ 関数的に放出された幼胚が、拡散・沈降した場合に中心から一定の位置に着底する確率密度分布を求め、現地観測で得られた幼胚の着生数分布と比較した。

3. 海藻幼胚の着底確率密度分布の予測手法

無限水深の海中において時刻 $t=0$ で水平方向の距離 $x=0$ 、海底上の高さ $z=z_0$ にあった幼胚が、沈降・拡散して海底の x の位置に着底する確率を求める。簡単のために2次元の場合を扱う。拡散を鉛直方向と水平方向に分け、鉛直方向には拡散係数を定数として扱い、水平方向に関してのみスケール依存性を考えることにする。

(1) 幼胚の海中での滞留時間

幼胚が時刻 t において海底 ($z=0$) より z の高さにあ

る確率 p_z は次式で表される。

$$\frac{\partial p_z}{\partial t} + w \frac{\partial p_z}{\partial z} = K_z \frac{\partial^2 p_z}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに w : 幼胚の沈降速度で一定の負の値と考える。

K_z : 鉛直拡散係数

上式を $t=0$ で $p_z(0, z)=\delta(z, z_0)$ の初期条件および幼胚の再浮上がないと仮定して海底での吸着条件 ($z=0$ で $p_z=0$) のもとで解いて次式が得られる。

$$p_z = \frac{1}{2(\pi K_z t)^{1/2}} \left[\exp \left\{ -\frac{(z-z_0)^2}{4K_z t} \right\} - \exp \left\{ -\frac{(z+z_0)^2}{4K_z t} \right\} \right] \cdot \exp \left\{ \frac{w(z-z_0)}{2K_z} - \frac{w^2 t}{4K_z} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

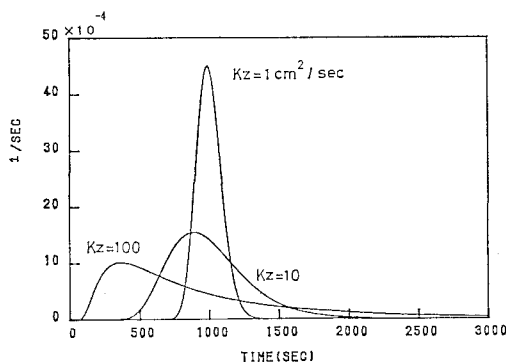
$t=0$ で $z=z_0$ にあった幼胚が、時刻 t で海底に達する確率 f_z は海底におけるフラックスから次式となる。

$$f_z(t) = \left[w p_z + K_z \frac{\partial p_z}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{1}{2(\pi K_z t)^{1/2}} \frac{z_0}{t} \cdot \exp \left\{ -\frac{(z_0+wt)^2}{4K_z t} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

後で述べるアカモク藻場からの幼胚の落下を想定し $z_0=5$ m, $w=5$ mm/s と仮定し、 K_z を変化させた場合の $f_z(t)$ を図—1に示す。 K_z が大きくなるにしたがって到達時間のピークは早くなるが長時間経過してもなお着底する確率も増大することがわかる。

(2) 水平拡散

水平方向 (x 方向) への拡散は、流れの場の構造によ



図—1 海底面における幼胚フラックス

* 正会員 農博 水産庁養殖研究所環境管理部環境制御研究室長
 ** 水産庁日本海区水産研究所資源増殖部長
 *** 水産庁養殖研究所環境制御研究室主任研究官

って決まるから、対象藻場周辺の観測からその特性を求める必要がある。本研究では実用的な幼胚の拡散予測手法を求めるために、水平方向の幼胚の存在確率 p_x が正規分布で近似できると仮定した。

$$p_x(x,t) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-u_0t)^2}{2\sigma^2}\right\} \dots\dots(4)$$

ここに u_0 は一様流成分であり、 σ^2 は統計的分散である。 σ^2 は時間の関数であると考え、その関数形は観測結果から求めることとした。

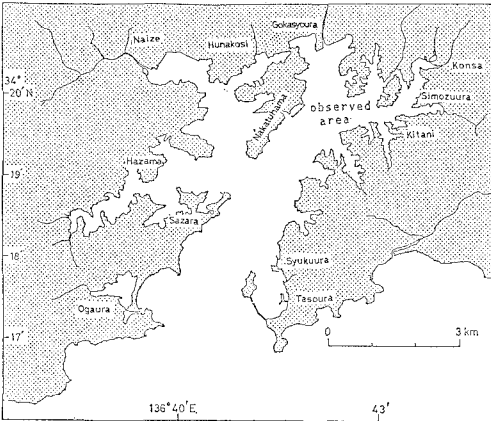


図-2 五ヶ所湾 (三重県)

(3) 着底確率密度分布

$t=0$ で $x=0, z=z_0$ にあった幼胚が海底の x の位置に着底する確率 $P(x)$ は式 (3) と式 (4) を組み合わせて次のように表される。

$$P(x) = \int_0^\infty f_z(t) \cdot p_x(x,t) dt \dots\dots\dots(5)$$

ここでは、一個の幼胚の着底確率を求めたが、幼胚放出源の分布と、放出時間の分布がわかっている場合は、それらを式 (5) に掛け合わせ、積分することで幼胚着生数密度分布を求めることができる。

4. 観測結果からの拡散パラメーターの推定

前節の結果から、拡散パラメーターとして、鉛直拡散係数および水平方向の統計的分散と時間の関係が求まれば、幼胚の着底確率密度分布を求めることができることがわかった。本節では、定点における流れの測定結果からこれらを求める。

拡散係数を算出するには、本来は染料や浮標群を追跡する Lagrange 的な観測を行う必要がある。しかし、藻場周辺では海藻の存在のために浮標の動きが妨げられること、濃度測定のための船の移動が困難なこと等の難点がある。そこで本研究では Lagrange 的な観測結果に対する Taylor (1921) の方法および Bowden (1974) らの方法が、Euler 的な観測結果にも適用できると仮定して拡

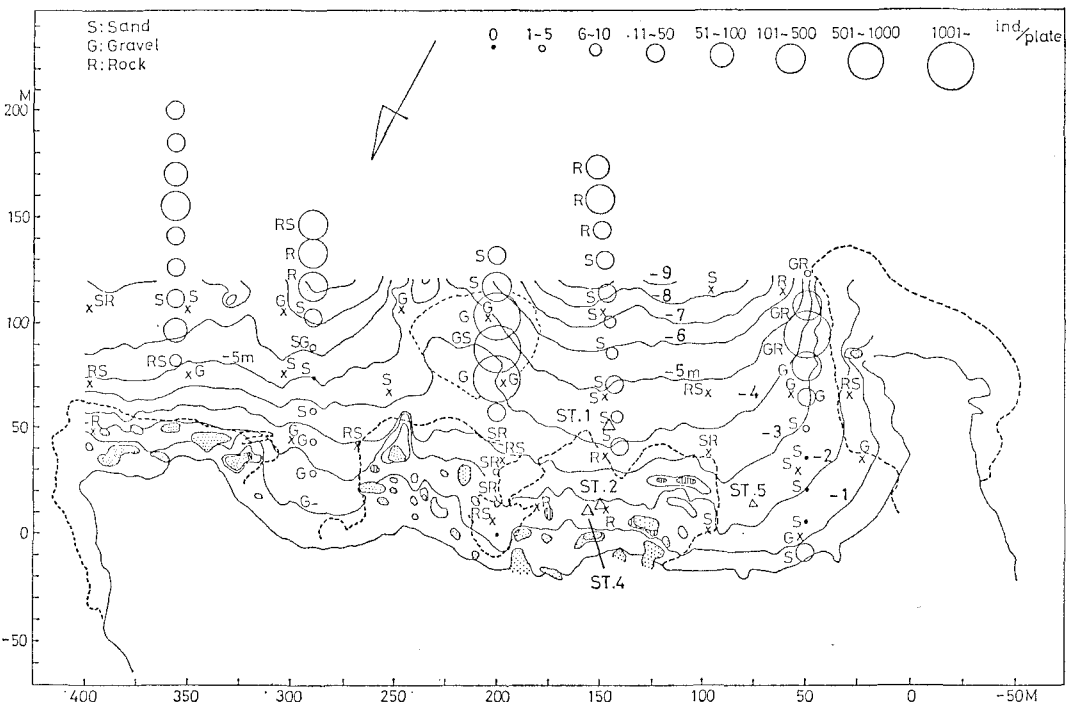


図-3 実験海域と実験用付着基盤の設置によって得られたアカモク幼胚の着生数の分布。点線は航空写真および目視により求めた岩礁帯、転石帯の範囲で藻場の範囲とほぼ一致する。付着基盤は1985年4月9日～18日にかけて設置し、5月8日～14日に回収した。×印は底質調査点、△印は流速調査点 (St. 1～4, 表-1) を示す。

散パラメーターを求めた。

(1) 調査海域と藻場の繁茂状況

調査は、すべて三重県五ヶ所湾の中津浜浦にある養殖研究所の研究水面で行った(図-2、図-3)。図-3の等深線は東京湾中等潮位(T.P.)を基準としたものであり、平均水面からの水深は図中の値より約1m深くなる。

る。この海域は2つの岬で囲まれた湾入部となっており、その中に岩礁帯の張り出しと砂泥地帯が交互に入り交じっている。また沖側にもいくつかの岩礁と転石帯がみられる。岩礁・転石帯では3~5月を中心として、アカモクを主体としたホンダワラ類が繁茂し夏には消失する。藻場中心部のアカモク密度は湿重で約4kg/m²である(杜多ら,1989)。

(2) 藻場内外の鉛直拡散係数

藻場の沖側(St.1、図-3)および藻場内(St.2)で電磁流速計によって乱れの鉛直分布を測定した(CASE 1-1, 1-2; 表-1)。測定結果からは周期6秒程度より短周期の波に起因する鉛直流速がみられた。アカモク幼胚の沈降の時間スケールとしては奥田(1985)によって得られている沈降速度(5mm/s)と、アカモクの全長(3~5m)から、600~1000秒程度の値が考えられる。この時間スケールでは波による流速成分は鉛直拡散に影響しないと考へて、得られた鉛直流速成分を移動平均(6.6秒)し、波運動の影響を除いたのち次式に従って鉛直渦動粘性係数を求め、これが鉛直拡散係数と近似的に等しいとみなした。

$$K_z = \langle w'^2 \rangle T_* \dots\dots\dots (6)$$

$$T_* = \int_0^\infty r_w(\tau) d\tau \dots\dots\dots (7)$$

ここに w' は波の影響を除いた鉛直流速の変動成分であり $\langle \rangle$ は平均を表す。また T_* を求める積分上限は、自己相関係数 $r_w(\tau)$ が始めて0となる時間で代用した。

求めた K_z の値は藻場の沖側で平均2.4cm²/s、藻場内で1.3cm²/sであった(図-4)。

(3) 水平方向の統計的分散と時間の関係

測流結果(CASE 2, 3; 表-1, 2)では南北方向の流

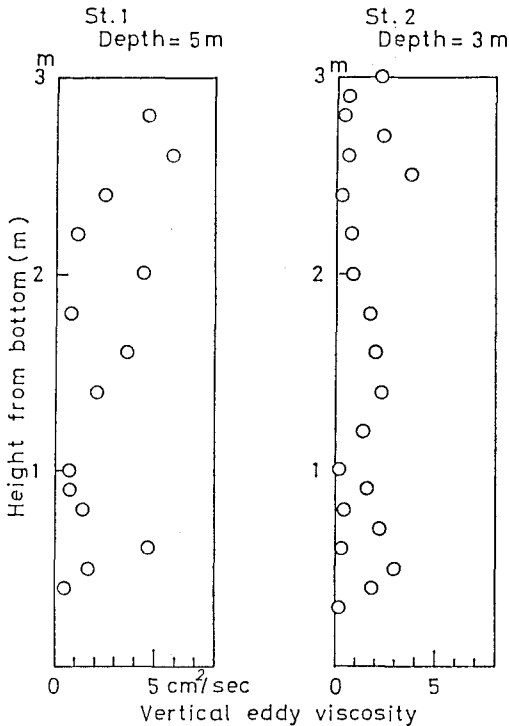


図-4 藻場沖(St.1)と藻場内(St.2)における鉛直拡散係数

表-1 流れの測定の一覧

Name	St.	Depth (m)	Sensor height (m)	measurement interval	Length of one record and duration of measurement
CASE 1-1	St.1	5.0	0.4-2.8	0.317sec	3 min 1985 4/30 13:00-15:00
CASE 1-2	St.2	3.0	0.3-3.0	0.317sec	3 min 1985 5/ 2 12:30-16:00
CASE 2-1	St.3	6.2	2	1 min	1 day 1987 3/ 9 11:00-
CASE 2-2	St.3	6.2	2	10 min	19 day 1987 4/14 0:00-
CASE 3	St.4	2.5	1	5 sec	1 day 1986 4/23 10:00-

表-2 測流結果

	CASE 2-1		CASE 2-2		CASE 3	
	E-comp.	N-comp.	E-comp.	N-comp.	E-comp.	N-comp.
mean (cm/sec)	0.13	0.68	0.37	0.30	0.42	-0.35
s. d. (cm/sec)	0.80	1.00	1.39	1.67	0.56	0.83
max. (cm/sec)	3.30	5.60	12.70	8.90	2.75	3.04
min. (cm/sec)	-2.60	-3.30	-6.20	-11.80	-2.46	-4.83
<i>a</i>	1.54	2.56	15.37	6.45	1.09	3.42
<i>m</i>	1.78	1.78	1.66	1.80	1.72	1.60

速が卓越していたことから、この方向の成分について解析を行った。幼胚の移動速度が固定点で測定した流速(u)で近似できると仮定すると、時間 t を経過した後での移動距離 $Y(t)$ は次式で表される。

$$Y(t)=\int_0^t u dt \dots\dots\dots(8)$$

測流結果を定常時系列と考えると時間原点をずらすことにより $Y(t)$ が T/t 個えられる (T : 測定時間)。幼胚の水平的な広がり範囲の指標として $Y(t)$ の統計的分散 (σ^2) を求め、図-5 に示した。図より

$$\sigma^2=at^m \dots\dots\dots(9)$$

と表すことができる。各測定ケースについて最小自乗法によって求めた a および m の値を表-2 に示す。この移動距離の分散 σ^2 と水平拡散係数 K_x には次の関係がある (Bowden, 1974)。

$$K_x=\frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} \dots\dots\dots(10)$$

式 (9) を用いるとこの式はさらに

$$K_x=\frac{1}{2} m a t^{m-1}=c\sigma^r \dots\dots\dots(11)$$

ここに $r=2(m-1)/m$ で c は定数である。
式 (11) は拡散係数のスケール依存性を表している。拡散理論によれば $m=1$ は K_x が一定の場合、 $m=2$ は拡散速度が一定の場合、 $m=3$ は慣性領域における拡散係数の空間スケールの $4/3$ 乗則を考慮した場合にあたり、分散初期には $m \approx 2$ となることが知られている。表-2 の値は $m \approx 1.7$ で 2 よりやや小さい値となっている。いずれにしても水平的な広がり尺度である σ^2 は経過時間を与えることにより式 (9) から予測できる。

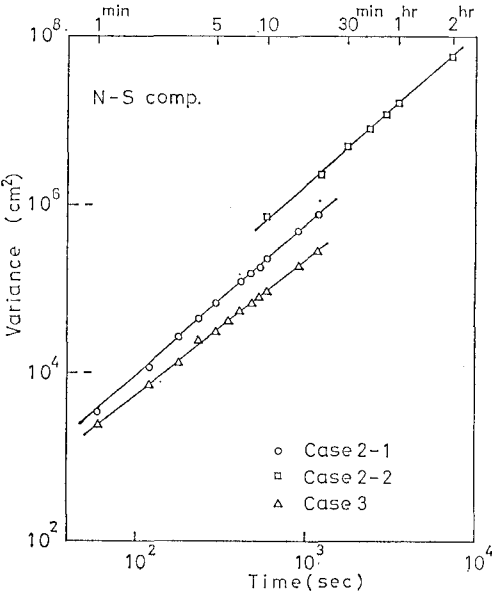


図-5 統計的分散 (σ^2) と時間 (t) の関係

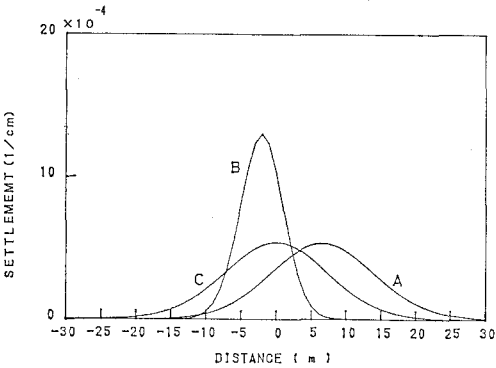


図-6 予測される着底確率密度分布
A: $z_0=500$ cm, $K_z=2.4$ cm²/s, $u_0=0.68$ cm/s, $\sigma^2=2.56t^{1.78}$
B: $z_0=300$ cm, $K_z=1.3$ cm²/s, $u_0=-0.35$ cm/s, $\sigma^2=3.42t^{1.6}$
C: $z_0=500$ cm, $K_z=0$ cm²/s, $u_0=0$ cm/s, $\sigma^2=2.56t^{1.78}$

(4) 着底確率密度分布の推定

測流結果から得られた鉛直拡散係数および t と σ^2 の関係式を用い、式 (5) を数値積分して得られた着底確率密度分布を図-6 に示す。図中の A の曲線は、沖側藻場の周辺域の代表点である St. 1 での観測 (CASE 1-1) から得られた鉛直拡散係数、St. 3 での観測 (CASE 2-1) から得られた移流成分および t と σ^2 の関係式を用いて計算した。また B の曲線は、岸側藻場周辺の代表点である St. 2 (CASE 1-2) および St. 4 (CASE 3) での測流結果を用いた。さらに C の曲線は A と同じ条件下で $u_0=0$, $K_z=0$ とした場合である。C と A の分布形はよく似ており、当海域程度の流動条件下で広がりだけを問題にする場合には鉛直方向の拡散を無視し、幼胚放出高さ (z_0) と沈降速度 (w) から決まる時間 ($=z_0/w$) における水平方向の分散を式 (9) から求めることでも予測を行うことができることを示している。

5. ホンダワラ類幼胚の着生数分布の測定

ステンレス枠に 10 cm×5 cm の透明塩ビ板をとりつけ実験用付着基盤とした (図-7)。対象海域 (図-3) に 5 つの定線を設け、各定線上に 15 m 間隔で実験用付着基盤を設置した。1 ヶ月後に回収して実体顕微鏡で幼胚着生数を計数した。得られた幼胚はほとんどがアカモクの幼胚であった。図-3 では水深 3 m 以浅には幼胚の着生がみられないが、これは波の影響が大きく、塩ビ板上に着底した幼胚が、分泌物によってしっかりと着生するまでに落下してしまうためである (杜多ら, 1989)。一方、水深 5 m 以深の藻場周辺では藻場の中心部で着生数が最も多く、中心から離れるにしたがって少なくなった。沖側藻場の母藻の密度分布と幼胚放出源の高さの分布は測定できなかった。そこで幼胚は沖側藻場中心の海底上 5 m

の位置から δ 関数的に放出されると仮定して、先に求めた幼胚の着底確率密度分布と比較した。図-8の実線は沖側藻場付近で得られた鉛直拡散係数 ($2.4 \text{ cm}^2/\text{s}$) およ

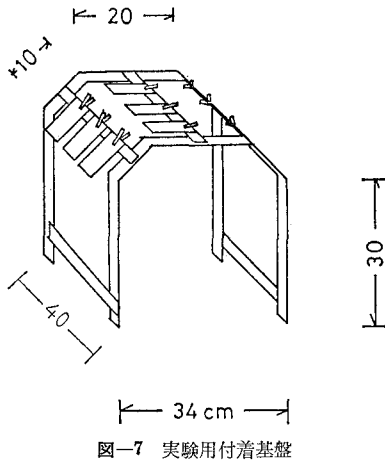


図-7 実験用付着基盤

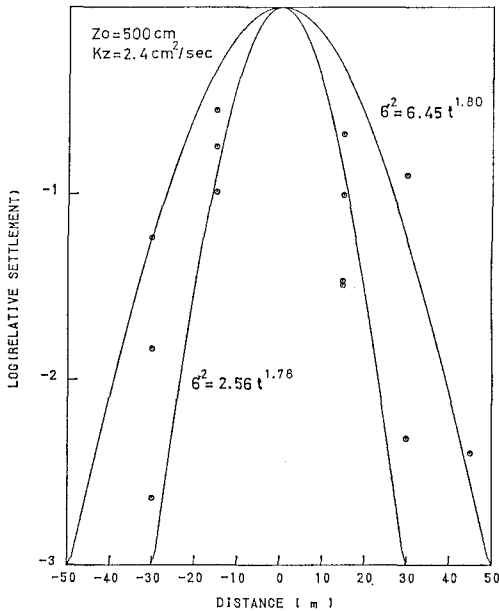


図-8 予測された分布(実線)と観測値(○)の比較

び水平方向の2回の観測(CASE 2-1, 2-2)から得られた t と σ^2 の関係を用いて計算した着底確率密度分布である。なおこの場合、計算より得られた着底確率密度分布のピークの位置を中心として図に示した。同図の○印は図-3の分布のうち水深3mで深のものについて、岸から沖に向かう各測線上の最大値が得られた点を中心として、中心からの距離と着生数の関係を示している。なお縦軸は各測線上の着生数の最大値で無次元化してある。測定された幼胚着生数の中心域からの減少の割合は、2つの曲線の間にはばおさまっており、計算結果は幼胚着生のおよその傾向を再現していると考えることができる。

6. 結 論

(1) 鉛直方向の拡散係数を一定として輸送方程式を解き、一定の高さから放出された幼胚の海中での滞留時間の分布を求めた。

(2) 水平方向の拡散が正規分布で近似できると仮定し、鉛直方向の滞留時間と組み合わせて海底に落下した幼胚の分布確率を求めた。

(3) 定点における流速測定結果をLagrange的な流速の代わりに用い、藻場周辺での鉛直拡散係数および水平方向の分散と時間との関係を求めた。

(4) 実験用付着基盤を多数海底に設置することにより海藻(アカモク)幼胚の着生数の分布を求め、流速測定結果から予測した分布とよく一致する結果を得た。

参 考 文 献

- 奥田武男(1985): ホンダワラ類における幼胚の入手と着生機構, 海洋科学, 17 (1), pp. 38~44.
- 杜多 哲・飯倉敏弘・北村章二(1989): ホンダワラ類幼胚の着生数の分布と波の影響, 日水誌, 55 (7), pp. 1161~1172.
- Bowden, K. F., D. P. Krauel and R. E. Lewis (1974): Some features of turbulent diffusion from a continuous source at sea. In "Advances in Geophysics" 18A, ed. by H. E. Landsberg and J. Van Miegheem, Academic Press, New York, pp. 315~329.
- Taylor, G. I. (1921): Diffusion by continuous movements, Proc. London Math. Soc., Ser. 2, Vol. 20, pp. 196~211.