



Title	ホタテガイ 稚貝放流時の着底位置の推定
Author(s)	山本, 勝太郎; YAMAMOTO, Katsutaro; 平石, 智徳 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 50(3), 175-192
Issue Date	1999-12
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/24195">https://hdl.handle.net/2115/24195</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	50(3)_P175-192.pdf



## ホタテガイ稚貝放流時の着底位置の推定

山本勝太郎<sup>1)</sup>・平石 智徳<sup>1)</sup>・小林 耕一<sup>2)</sup>

### Estimated Sinking Rate and Location on the Seabed of Scallop Juveniles Sowed at the Sea Surface

Katsutaro YAMAMOTO<sup>1)</sup>, Tomonori HIRAIISHI<sup>1)</sup> and Kouichi KOBAYASHI<sup>2)</sup>

#### Abstract

In scallop seabed sowing, fishermen release scallop juveniles into the sea at the sea surface without knowing how they sink or where they settle. In this paper, to help improve this sowing method, two experiments were carried out; 1) the terminal velocities of sinking live scallop (*Patinopecten yessoensis*) juveniles were individually measured in a seawater column tank, and 2) the distribution of scallop juvenile models in relation to water flow speed was observed after sinking in a uniform flow water tank. The model was made by filling up silicon resin into one pair of scallop shells. The results show that the terminal sinking velocity was nearly described by the well known terminal velocity formula of a normal falling body, and about 90% of the juvenile models settled in an ellipse with a radius equal to twice the standard deviation in both the major and minor axes. Finally, the distribution of scallop juveniles on the seabed was estimated using a calculation under the simplest conditions.

**Key words:** Scallop seabed sowing, Sinking experiment, Scallop juvenile model, Drag coefficient, Terminal velocity, Normal distribution

オホーツク沿岸海区では、中間育成によって 25 mm から 50 mm 程に成長したホタテガイ稚貝を、指定海域に放流して 4 年間自然成長させてから 8 尺と呼ばれる桁網で漁獲する「ホタテガイ地まき漁業」が行われている。網走漁協では指定海域を 4 海域に分け 4 年毎の輪作方式を採用しホタテガイ地まき漁業の資源管理を行っている。一つの海域はさらに細かい区画に分けられ、この区画毎に地まきが行われる。

この地まき漁業において、「ホタテガイ稚貝を指定された区画に地まきするには海上のどの地点で稚貝を放流すればいいのか」という問題がある。

本研究は、ホタテガイ稚貝の静水中の落下実験と回流水槽を使用した流水中の落下実験から得られたデータを基に、ホタテガイ稚貝放流時の着底位置について推定したものである。

---

<sup>1)</sup> 北海道大学水産学部生産工学講座  
(Laboratory of Production Engineering for Fisheries, Faculty of Fisheries, Hokkaido University  
Hakodate, 041-8816 Japan)

<sup>2)</sup> 北海道網走漁業協同組合  
(Abashiri Fisheries Cooperative Association, Abashiri, 093-0032 Japan)

### 静水中における落下実験

#### 試料

実験に使用したホタテガイ (*Patinopecten yessoensis*) 稚貝は、平成9年6月7日に網走漁業協同組合が実施したホタテガイ稚貝放流事業の際に現地で入手した。この稚貝をその日のうちに北海道大学水産学部へ保冷状態で陸送し同学部の飼育水槽で蓄養した。

落下実験は搬送から4日目と5日目の6月10日と11日の両日に行い、生きたままの稚貝180個(殻高2.20 cm~5.66 cm, 平均殻高4.12 cm)を使用した。このうち80個体については、殻高をノギスを用いて0.1 mmまで、空中重量(湿状態)と海水中重量をメトラ電子天秤で0.1 gまで測定した。また、残りの100個体については殻高のみを測定した。さらに、このうちの20個体については、右殻を下にして水平な面上に置きその真上からテレビカメラで貝殻を撮影し、そのビデオ画像から画像処理によって貝殻の最大投影面積を測定した。

#### 方法

静水中における落下実験は、縦180 cm, 横50 cm, 幅40 cmの角形縦型水槽を使用した。水槽の正面は厚さ10 mmの透明アクリル板から成っている。この水槽に深さ175 cmまで海水を入れ落下実験を行った。ホタテガイ稚貝は、水槽の真ん中から手に持った稚貝を1個ずつ水面際で稚貝が空中に露出しないように沈めた位置から落下させた。この時の稚貝の水面に対する初期姿勢をFig. 1に示すように、1) 右殻を下に向けた姿勢、2) 左殻を下に向けた姿勢、3) 蝶番を下に向けた姿勢、4) 蝶番を上に向けた姿勢の4通りにして実験を行った。

この落下中の稚貝を実験水槽正面からテレビカメラで撮影した。収録したビデオテープはモニターテレビで再生し画面上にタイムジェネレーターにより1/100秒刻みの時間を入れ、さらにコンピューター画面をスーパーインポーズさせて1/3秒毎に稚貝の中心位置をマウスでクリックして

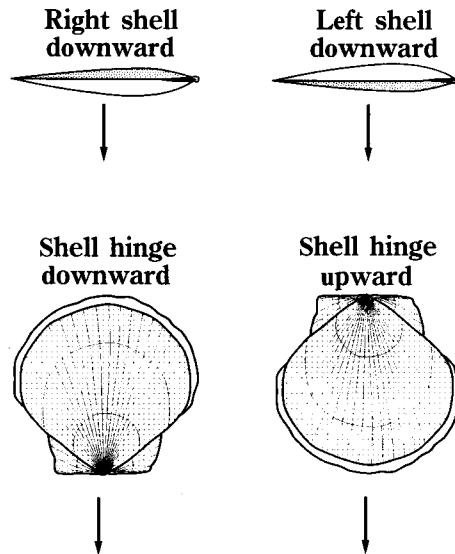


Fig. 1. Initial position of live scallop juveniles at the start of the sinking experiment in a seawater column tank. Arrow represents the sinking direction.

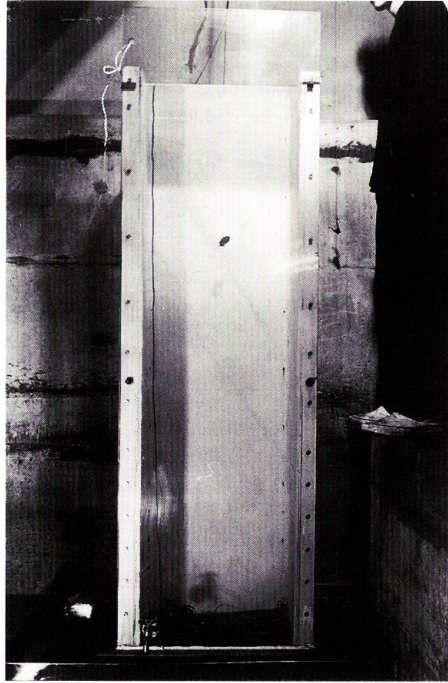


Fig. 2. Photograph of sinking experiment in a seawater column tank to measure the terminal velocity of live scallop juveniles.

この点の縦横のドット数を記録した。このドット数に実寸換算係数を乗じて落下開始からの位置座標を算出し、稚貝の平面的な落下軌跡を求めた。

実験状況の写真を Fig. 2 に示す。実験時の水温は 12°C であった。

## 結果

### 1. ホタテガイ稚貝の大きさ と 比重

空中重量 (湿状態) と海水中重量を測定した 80 個体の稚貝について、その殻高  $H_s$  (cm) と空中重量  $W_a$  (g)、海水中重量  $W_w$  (g) との関係を両対数グラフ上にプロットしたのが Fig. 3 である。最小自乗法によって求めた殻高  $H_s$  (cm) と空中重量  $W_a$  (g)、海水中重量  $W_w$  (g) との関係はそれぞれ次式で与えられる。

$$W_a = 0.166 H_s^{2.77} \quad (n=80, r^2=0.953) \quad (1)$$

$$W_w = 0.0668 H_s^{2.51} \quad (n=80, r^2=0.910) \quad (2)$$

空中重量と海水中重量の差から求めたこの 80 個のホタテガイ稚貝の平均比重は 1.43 (標準偏差 0.0835) であった。

また、20 個体について求めた最大投影面積  $S$  (cm<sup>2</sup>) と殻高  $H_s$  (cm) との関係を Fig. 4 に示す。この回帰式は次式で与えられる。

$$S = 0.838 H_s^{1.94} \quad (n=20, r^2=0.996) \quad (3)$$

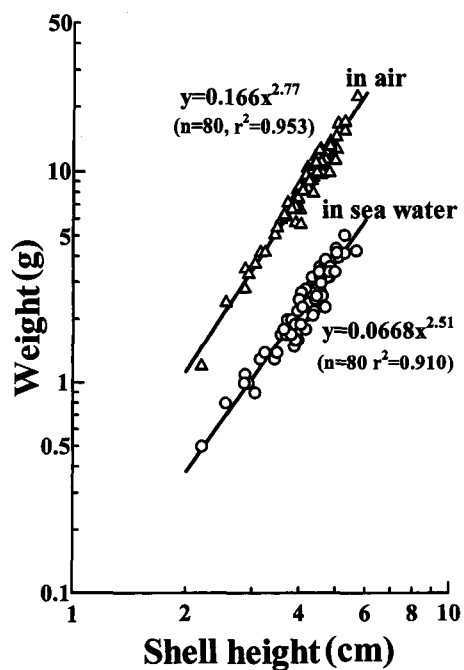


Fig. 3. Relation between shell height and weight in air and water.

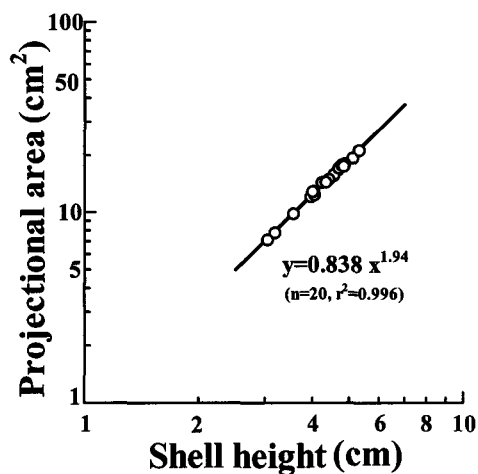


Fig. 4. Relation between shell height and projectional shell area.

殻高と海水中重量との関係は、江幡ら (1999) が、殻高 22.0 mm~143.8 mm の範囲の稚貝から成貝を含む試料について近似的に殻高の 3 乗に比例するとしているが、本実験に使用した稚貝については殻高の 2.5 乗に比例する結果を得た。

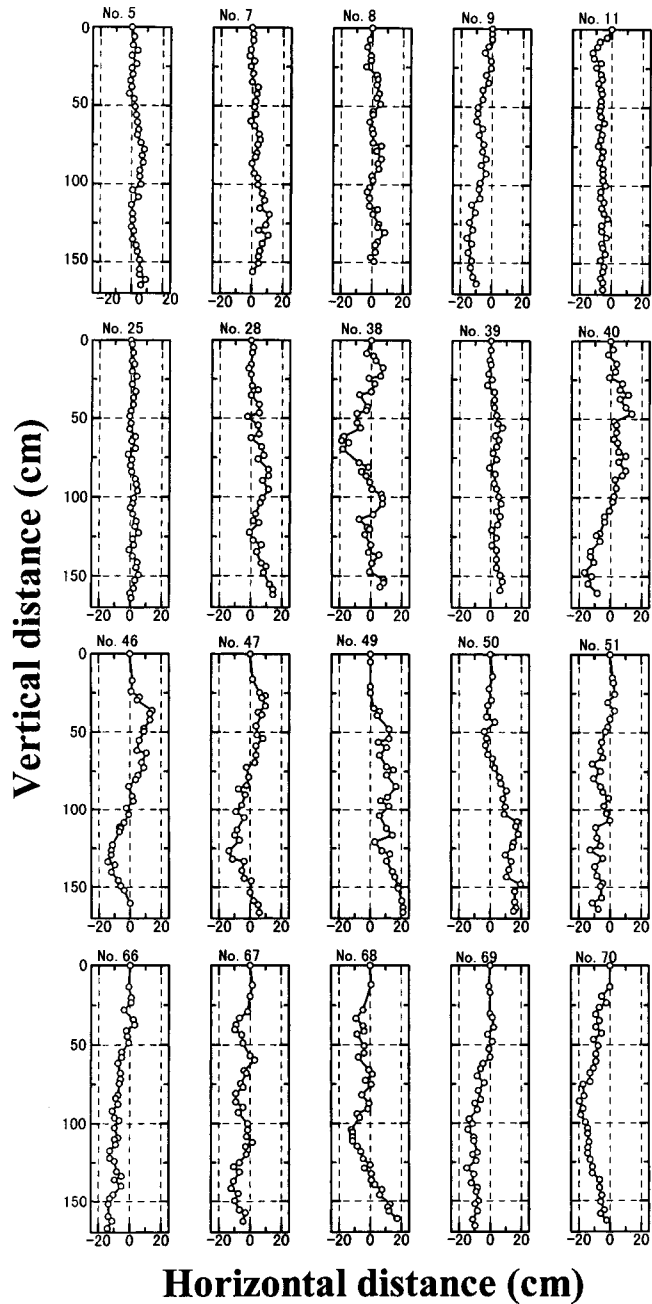


Fig. 5. Example of sinking paths for live scallop juveniles initially positioned with the right shell downward (top row), left shell downward (second row), shell hinge downward (third row) and shell hinge upward (bottom row). Sample number is written on the left shoulder of each column.

## 2. 稚貝の落下軌跡とその姿勢

落下実験中、稚貝が水槽の側壁面に接触することなく水槽の底まで落下した個体数は、1) 右殻を下に向けた初期姿勢で落下させた 61 個体のうち 41 個体 (67%)、2) 左殻を下に向けた初期姿勢で落下させた 42 個体のうち 13 個体 (31%)、3) 蝶番を下に向けた初期姿勢で落下させた 41 個体のうち 27 個体 (66%)、4) 蝶番を上に向けた初期姿勢で落下させた 36 個体のうち 26 個体 (72%) の合計 107 個体であった。以後静水中の落下実験の結果として、これら 107 個体のデータを使用する。107 個体のうちの 20 例について初期姿勢別にそれぞれ 5 個体の落下軌跡を Fig. 5 に示す。

初期姿勢を、1) の右殻を下に向けた場合、41 個体の全てが右殻を下に向けた状態で木の葉が落ちるように左右に揺れながら落下した。2) の左殻を下に向けた場合にはその 69% が水槽の壁面に接触し、1) の場合よりも斜め横方向に落下する個体が多かった。また、壁面に接触せず落下した 13 個体は左殻を下に向けたまま左右に揺れながら落下した。3) の蝶番を下に向けた場合には、壁面に接触せず落下した 27 個体の全部が手を離すと同時にスリと右殻を下に向けた状態となりそのまま 1) と同様に木の葉が落ちるように落下した。4) の蝶番を上に向けた場合には、右殻を下向きにして落下した稚貝が 19 個体、左殻を下向きにして落下した稚貝は 7 個体であった。

## 3. 稚貝の落下終速度

107 個体の全てについて、その 1/3 秒毎の位置座標から、落下開始からの経過時間と垂直落下距離との関係を求めた。この関係を初期姿勢別にそれぞれ 3 個体分を Fig. 6 に示した。

図から明らかなように、どの初期姿勢でも落下開始から 2 秒も経過すると、経過時間と垂直落下距離との間には直線関係が成り立ち落下速度が一定になることが分かる。このことから、落下開始 2 秒後からの経過時間でその間の垂直落下距離を除いた値をホタテガイ稚貝の落下終速度とした。107 個体の殻高と終速度との関係を Fig. 7 に示す。平均の落下終速度は 12.9 cm/s (平均殻高 3.98 cm) であった。また、殻高  $H_s$  (cm) と終速度  $V_t$  (cm/s) の関係を表す回帰式は

$$V_t = 8.01 H_s^{0.341} \quad (n=107, r^2=0.211) \quad (4)$$

と求まるがその相関はあまり高くはない。

## 4. 稚貝の抗力係数

静水中の落下実験において、ホタテガイ稚貝の垂直落下速度が終速度に達した時には、稚貝が受ける流体抵抗 (抗力) と稚貝の水中重量とが等しくなり、抗力係数  $C_d$  は次式で与えられる。

$$C_d = \frac{2W_w g}{\rho S V_t^2} \quad (5)$$

ここに、 $W_w$  は海水中重量 (g)、 $g$  は重力加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )、 $\rho$  は海水の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )、 $S$  は稚貝の垂直落下投影面積 ( $\text{cm}^2$ )、 $V_t$  は落下終速度 ( $\text{cm/s}$ ) である。

稚貝の落下中の姿勢は一定ではなく時々刻々変化するから、(5) 式は静水中を落下する稚貝の平均的な抗力係数  $C_d$  を表す式である。

側壁に接触することなく落下した 107 個体について、(5) 式を使って抗力係数  $C_d$  と殻高  $H_s$  (cm) との関係を図示したのが Fig. 8 であるが、抗力係数と殻高との間には明瞭な相関は見られず、107 個体の抗力係数の平均を求めると 2.0 となった。

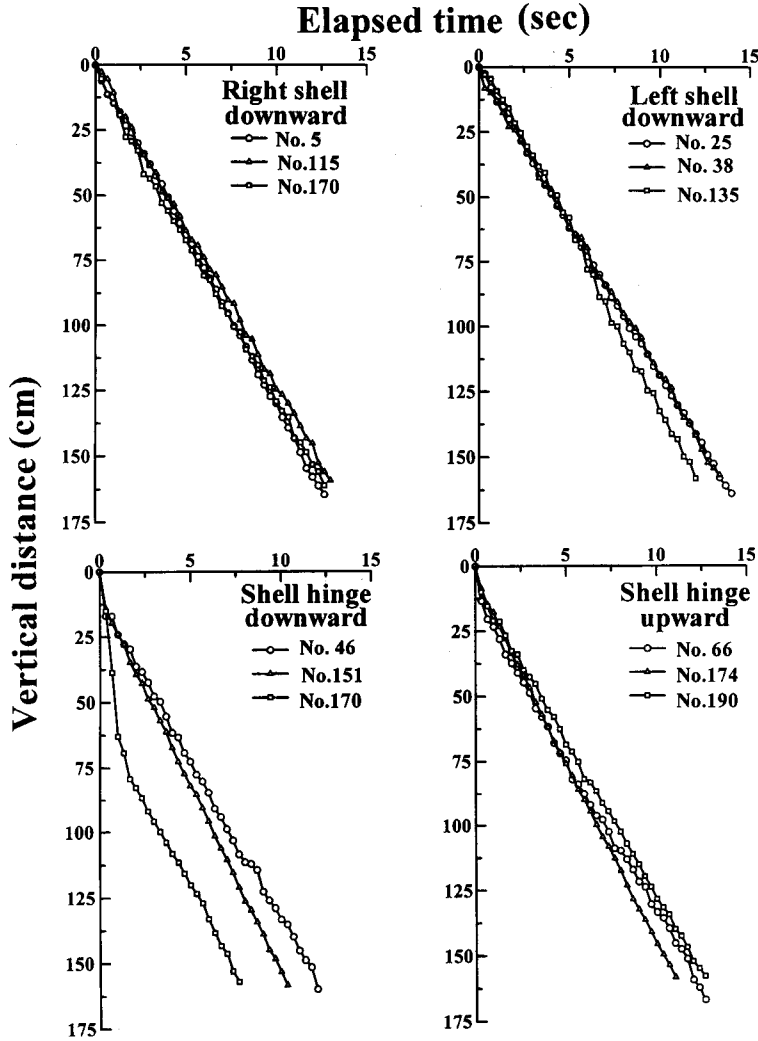


Fig. 6. Relation between elapsed time and vertical distance in the sinking experiment.

### 流水中における落下実験

#### 試料

本実験では生きたままの稚貝を使用したのではなく、先に述べた網走漁業協同組合が実施したホタテガイ稚貝放流事業の際に現地で購入した稚貝をボイルして身を取り出した殻に、シリコン(コニシ株式会社, シリコンシーラント)を適量充填した稚貝モデル218個(殻高2.34 cm~5.31 cm, 平均殻高4.16 cm)を使用した。この稚貝モデルの平均空中重量は8.16 g, 平均水中重量は2.48 gである。また、その平均比重は1.44であり生きたままの稚貝の比重1.43にほぼ等しい稚貝モデルを作ることが出来た。ただし、この稚貝モデルの重心が生きたままの稚貝の重心と同じ位置にあるかどうかについては確かめていない。

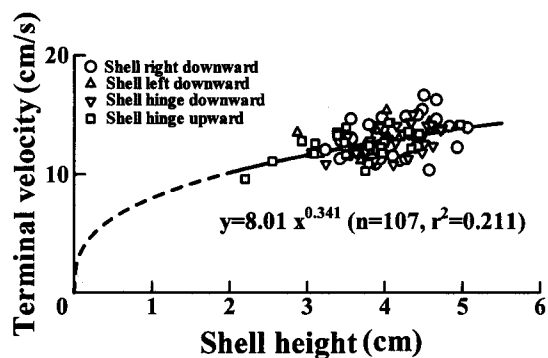


Fig. 7. Relation between shell height and terminal velocity.

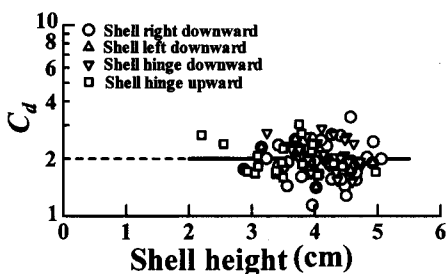


Fig. 8. Relation between shell height and drag coefficient.

方法

実験は北海道大学水産学部の大形回流水槽（真水）を使用して行った。水槽は幅 2 m，深さ 1.2 m，観測水路 6 m である。水深は 1 m とし，水槽の底に 10 cm 間隔でグリッドスケールを罫いたプラスチック板を敷いた。

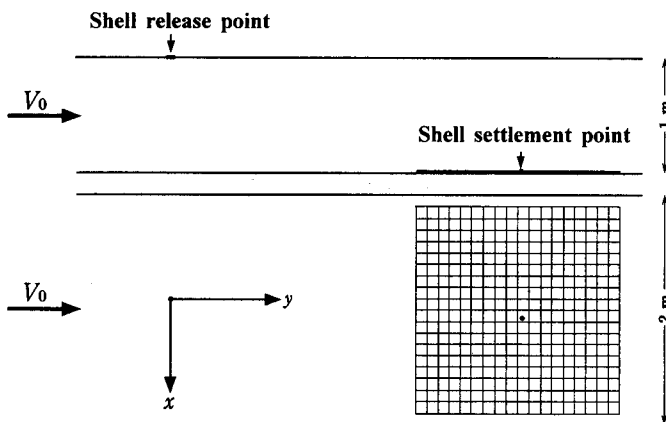


Fig. 9. Side and top views of sinking experiment in a uniform flow tank showing set  $x-y$  coordinate axes.

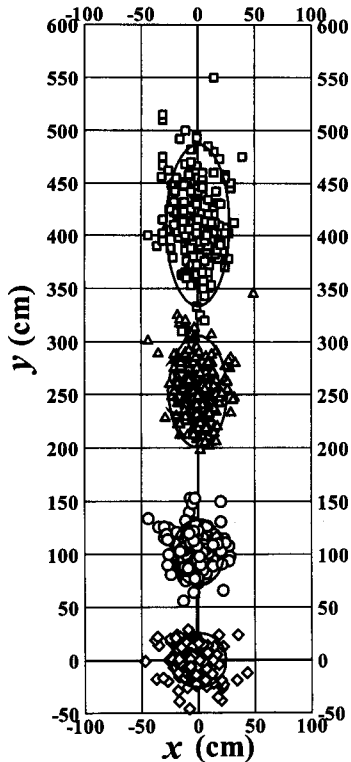


Fig. 10. Distribution of scallop juvenile models after sinking at four flow speeds.  
 ◇, 0 cm/s; ○, 11.5 cm/s; △, 31.4 cm/s;  
 □, 51.9 cm/s.

落下実験は、流速  $V_0$  を 0 cm/s, 11.5 cm/s, 31.4 cm/s, 51.9 cm/s とした定常流中を、稚貝モデルが空中に露出しない水面際に沈めた位置から右殻を下向きにした姿勢で落下させて行った。落下開始から着底までの時間はストップウォッチで測定し、落下位置は水槽底面に敷いたグリッドスケールの位置座標から直接読み取った。落下姿勢を右殻下向きだけとしたのは、静水中の落下実験の結果から、実際の放流時において稚貝はその大部分が右殻を下向きして落下するものと予想したためである。また、稚貝モデルは実験開始直前まで真水に浸しておき、内部に空気を含まないように注意した。

## 結果

### 1. 着底位置とその分布

便宜上、座標軸を Fig. 9 に示すように定める。すなわち、稚貝モデルの放流位置を原点 (0, 0) とし、流れ方向に  $y$  軸 (水槽の長さ方向)、これに直角な方向に  $x$  軸 (水槽の幅方向) をとる。

実験を行った全ての稚貝モデルの着底位置を流速別に記号を変えて Fig. 10 に示す。図から、流速が大きくなると稚貝は遠くに落下着底しその  $y$  座標の分布範囲も広がるが、 $x$  座標の分布範囲は流速が大きくなってもほとんど変化しない。着底位置の  $x$  座標、 $y$  座標の平均値とその標準偏差を Table 1 に、標準偏差と流速の関係を Fig. 11 に示す。図から  $y$  座標の標準偏差  $\sigma_y$  (cm) と流速  $V_0$  (cm/s) との間には明らかに直線関係が成り立ち、その回帰直線式は次式で表せる。

$$\sigma_y = 0.503 V_0 + 11.3 \quad (n=4, r^2=0.984) \quad (6)$$

Table 1. Summary of the results of sinking experiment in an uniform flow tank for the scallop juvenile models. Average model's shell height is 4.16 cm.

Flow speed $V_0$ (cm/s)	$x$ direction				$y$ direction			
	0	11.5	31.4	51.9	0	11.5	31.4	51.9
Average settlement distance (cm)	-3.9	-1.2	0.8	-0.8	-1.8	101.8	253.2	410.3
Standard deviation (cm)	12.2	11.3	12.8	13.9	12.8	15.5	26.3	38.2
Average sinking time (sec)	8.18	7.96	7.90	8.05	8.18	7.96	7.90	8.05
Average sinking speed (cm/s)					-0.22	12.8	32.1	51.0
Number of models	215	218	218	213	215	218	218	213

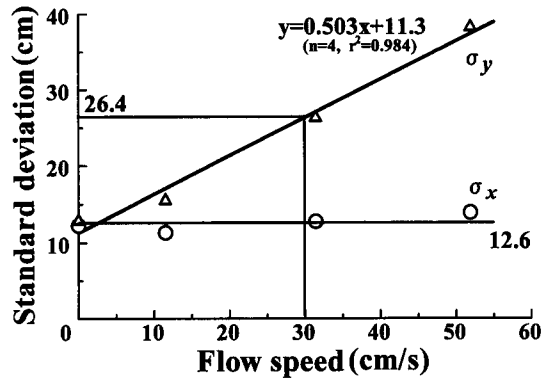


Fig. 11. Change in the standard deviations ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) of  $x$  and  $y$  directions with flow speed.

一方,  $x$  座標の標準偏差  $\sigma_x$  (cm) は流速  $V_0$  の大きさに係わらず殆ど一定であるから, ここではその平均をとって

$$\sigma_x = 12.6 \text{ (一定)} \quad (7)$$

とした。

また, 着底位置の  $x$  座標,  $y$  座標を階級幅を 10 cm としてそのヒストグラフを画くとそれぞれ Fig. 12, Fig. 13 のようになる。図から明らかなように, これらのグラフが正規分布型となることから, Table 1 に示す平均着底位置の値をそれぞれ  $x_m$ ,  $y_m$ , 標準偏差を  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  として次式で表せる正規分布の確率密度関数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(x-x_m)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (8)$$

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(y-y_m)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (9)$$

に代入して確率を計算し, この値にそれぞれの実験個体数 (Table 1 のモデル数) を掛けて着底位置に対する正規分布曲線を求めた。この正規分布曲線を Fig. 12, Fig. 13 のヒストグラフ上に重ねると

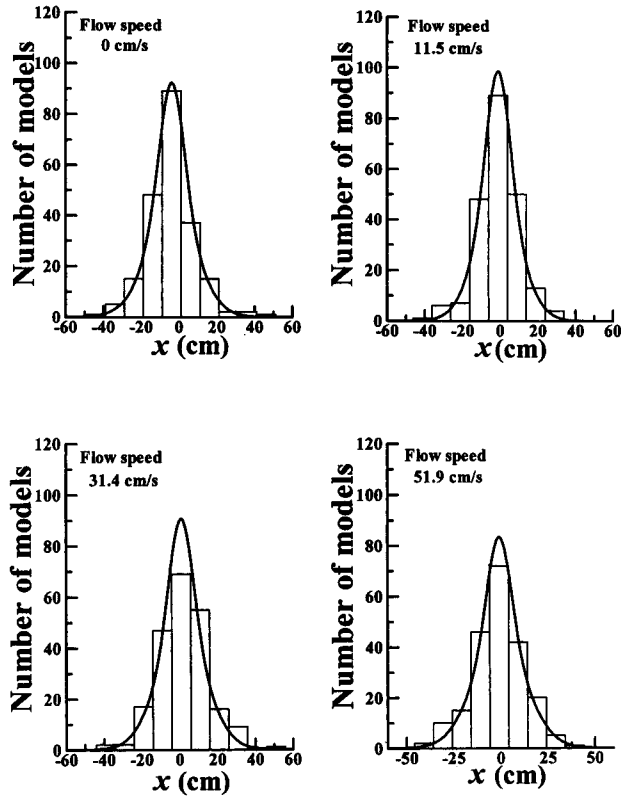


Fig. 12. Histograms of the  $x$  coordinates of the scallop juvenile model settlement points with fitted normal distribution curve.

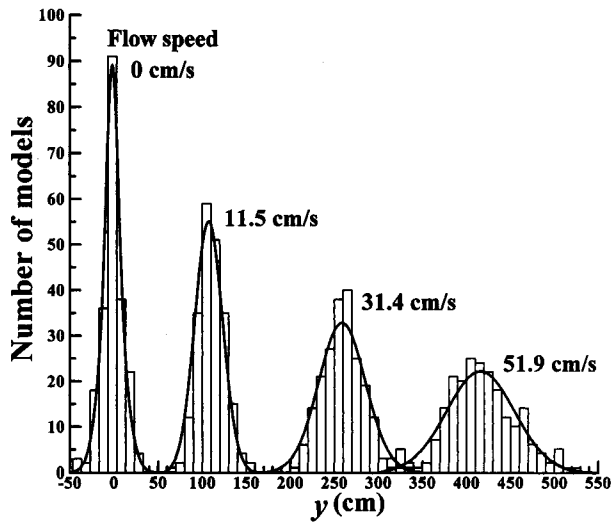


Fig. 13. Histograms of the  $y$  coordinates of the scallop juvenile model settlement points with fitted normal distribution curve.

非常に良い一致を見た。このことから着底位置の分布は正規分布すると考えて良いことが分かる。

2. 着底位置の分布範囲を表す楕円

Fig. 10 の着底位置の分布図の上に画いた楕円は, Table 1 に示した各流速における  $x$  座標,  $y$  座標の標準偏差  $\sigma_x, \sigma_y$  を使ってその 2 倍の径を持つ楕円

$$\frac{x^2}{(2\sigma_x)^2} + \frac{(y-y_m)^2}{(2\sigma_y)^2} = 1 \tag{10}$$

を画いたものである。ただし, Table 1 から分かるように, 着底位置の  $x$  座標の平均値が 0 に近いことおよび流速が 0 cm/s の時の  $y$  座標の平均値も 0 に近い値となることから, 各楕円の中心の  $x$  座標および流速が 0 cm/s の時の  $y$  座標は 0 とした。

このようにして画いた楕円の内側に着底した稚貝モデルの割合は, 流速が 0 cm/s で 84%, 11.5 cm/s で 89%, 31.4 cm/s で 89%, 51.9 cm/s で 88% となり稚貝モデルのほぼ 90% がこの楕円の内に着底していることがわかる。

着底位置の推定式

流水中を落下するホタテガイ稚貝の運動方程式

Fig. 14 に示すように, ホタテガイ稚貝が船縁から海面に放流される時の稚貝の運動方程式を垂直方向 ( $z$  軸) と水平方向 ( $y$  軸) に分けて考え, 稚貝の垂直方向と水平方向の落下速度をそれぞれ垂直落下速度, 水平落下速度, また落下距離についても同様に垂直落下距離, 水平落下距離と呼ぶこととする。座標 ( $y, z$ ) の原点は稚貝の放流位置とし,  $z$  軸は鉛直下向きを正に  $y$  軸は流れの進行方向を正にとるものとする。また時間  $t$  は放流開始時を 0 とする。

1. 垂直方向

垂直方向には, 次式で表される落体の運動方程式 (例えば小平 (1931)) が成り立つものとする。

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = W_w g - \frac{1}{2} C_d \rho S V_z^2 \tag{11}$$

ここに,  $m$  は落体の質量,  $W_w$  は落体の水中重量,  $g$  は重力加速度,  $C_d$  は落体の抗力係数,  $\rho$  は海水の密度,  $S$  は落体の投影面積,  $V_z$  は落体の垂直落下速度である。

この微分方程式を, 時間  $t=0$  で  $V_z = V_{zi}$  (垂直落下初速度),  $z=0$  の初期条件で解くと, 垂直落下速度  $V_z$  と垂直落下距離  $z$  を与える式はそれぞれ次式となる。

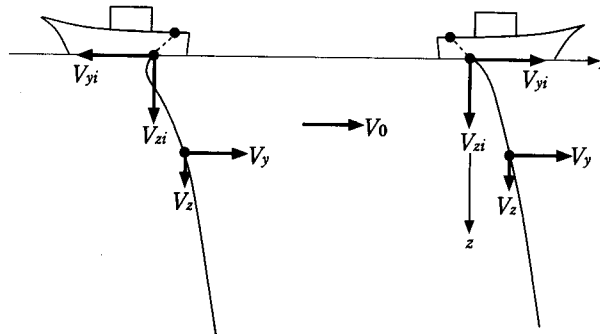


Fig. 14. Schematic diagram of a sinking scallop juvenile released from a cruising boat.

山本ら：ホタテガイ稚貝放流時の着底位置の推定

$$V_z = V_t \frac{(V_t + V_{zi})e^{2kV_t t} - V_t + V_{zi}}{(V_t + V_{zi})e^{2kV_t t} + V_t - V_{zi}} \quad (12)$$

$$z = \frac{1}{k} \left[ \ln \frac{(V_t + V_{zi})e^{2kV_t t} + V_t - V_{zi}}{2V_t} \right] - V_t t \quad (13)$$

ここに、 $\ln$  は自然対数を表す記号であり、 $k$ 、 $V_t$  はそれぞれ次式で与えられるものとする。

$$k = \frac{1}{2m} C_d \rho S \quad (14)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{2W_w g}{C_d \rho S}} \quad (15)$$

(15) 式は良く知られた落体の終速度を与える式である。また、(12)、(13) 式はいずれも時間  $t$  が十分大きくなると、それぞれ  $V_t$ 、 $V_t t$  に収束する式である。

## 2. 水平方向

水平方向については、ホタテガイ稚貝が受ける流れ方向の力（水平外力）を抗力のみと考えると、稚貝の入水時の水平落下初速度  $V_{yi}$  が海流の速度  $V_0$  より小さいか大きいかによって稚貝の運動を次の2つの場合に分けて考えなければならない。また、以下の式においては、稚貝の落下姿勢は木の葉が落ちるように左右に揺れ時々刻々その姿勢を変えることから、水平方向の抗力係数値は垂直方向の抗力係数値と同じになるものと見なして、水平方向の抗力係数記号にも垂直方向と同じ  $C_d$  を使用した。

### 2.1. 抗力が稚貝を流れ方向に押し進める場合 ( $V_{yi} \leq V_0$ )

これは、例えると「人混みの中で周りの人よりもゆっくり歩こうとしても後ろから押される」のに相当する。この場合、稚貝の水平方向の運動方程式は次式のように書ける。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{1}{2} C_d \rho S (V_0 - V_y)^2 \quad (16)$$

垂直方向の時と同じように、時間  $t=0$  で  $V_y = V_{yi}$ 、 $y=0$  の初期条件で解くと次式を得る。

$$V_y = V_0 - \frac{V_0 - V_{yi}}{k(V_0 - V_{yi})t + 1} \quad (17)$$

$$y = V_0 t - \frac{1}{k} \ln[k(V_0 - V_{yi})t + 1] \quad (18)$$

(17)、(18) 式は初期速度  $V_{yi}$  が0の時にもマイナスすなわち流れ方向と反対向きの時にも成り立つ。

### 2.2. 抗力が稚貝を流れ方向と反対向きに押し戻す場合 ( $V_{yi} \geq V_0$ )

これは、「人混みの中で周りの人よりも速く歩こうとしても前につかえて進めない」場合であり、運動方程式は次式のように書ける。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{1}{2} C_d \rho S (V_y - V_0)^2 \quad (19)$$

この微分方程式を解いて次式を得る。

$$V_y = V_0 + \frac{V_{yi} - V_0}{k(V_{yi} - V_0)t + 1} \quad (20)$$

$$y = V_0 t + \frac{1}{k} \ln[k(V_{yi} - V_0)t + 1] \quad (21)$$

### 実験値と計算値の比較

ここでは、静水中の落下実験と流水中の落下実験について実験値と計算値の比較を行う。

#### 1. 理論式による落下速度と落下距離の時間変化

まず最初に、運動方程式から導いた (12) 式～(18) 式によって表される垂直落下速度  $V_z$ 、垂直落下距離  $z$  と水平落下速度  $V_y$ 、水平落下距離  $y$  が時間の経過とともにどのように変化するかについて試算した。計算結果を Table 2 に示す。計算に使用した数値は次の通りである。

殻高  $H_s=4.16$  cm, 稚貝の質量  $m=8.16$  g, 稚貝の海水中重量  $W_w=2.48$  g (以上 3 つの値は稚貝モデルの平均値), 稚貝の投影面積  $S=13.3$  cm<sup>2</sup> ((3) 式から), 流速  $V_0=11.5$  cm/s と 51.9 cm/s (実験時の流速), 水平落下初速度  $V_{yi}=0$  cm/s, 垂直落下初速度  $V_{zi}=0$  cm/s, 真水の密度  $\rho=1.00$  g/cm<sup>3</sup>, 抗力係数  $C_d=2.0$  (Fig. 8 より) と 0.5 (江幡 (1999) を参考)。したがって,  $k=1.63$ /cm ( $C_d=2.0$  の時),  $k=0.407$ /cm ( $C_d=0.5$  の時) ((14) 式から), 終速度  $V_t=13.5$  cm/s ( $C_d=2.0$  の時) と 27.0 cm/s ( $C_d=0.5$  の時) ((15) 式から) となる。

Table 2 の計算結果を見て分かる通り,  $C_d=2.0$  とした時の垂直落下速度は落下開始から 0.15 秒も経過すると殆ど (15) 式で与えられる終速度 13.5 cm/s に達し, 垂直落下距離は 2.0 秒後には  $V_t t$  (終速度×経過時間) と見なしでも良い値となっている。また, 水平落下速度も 4 秒後には殆ど流速値 11.5 cm/s と 51.9 cm/s に達し, 水平落下距離も  $V_0 t$  (流速×経過時間) で表せる値に近くになっている。一方,  $C_d=0.5$  とした時には,  $C_d=2.0$  の時よりも時間は掛かるがやはり同じことが言える。

以上の計算結果から, 実際の放流時においては放流から着底までに要する時間は数百秒のオーダーであることを考慮すれば, ホタテガイ稚貝の垂直落下速度を求めるのに (15) 式で与えられる落下終速度の式を使って良いこと, また水平落下速度は流速そのものであると考えて良いことが分かる。次に, このことを実験値との比較において検証する。

#### 2. 流水中のホタテガイ稚貝の抗力係数

稚貝モデルを使って行った流水中の落下実験の結果をまとめた Table 1 の落下所要時間約 8 秒の垂直および水平落下距離と計算によって求めた Table 2 の経過時間 8 秒の値を比較すると,  $C_d=2.0$  とした時の値が垂直および水平方向ともに実験値と良く合っていることが分かる。このことから, 静水中の落下実験で得られたホタテガイ稚貝の平均的な抗力係数  $C_d=2.0$  は流水中の垂直および水平方向の抗力係数値として採用してよいことが分かる。

#### 3. 落下終速度と水平落下距離の実験値と計算値の比較

静水中の落下実験で求めた生きたホタテガイ稚貝 107 個体の落下終速度の実験値と, これらの稚貝の 1 個 1 個の水中重量と投影面積の値および  $C_d=2.0$  を (15) 式に代入して求めた落下終速度の計算値との比較を Fig. 15 に示す。プロット点にはかなりのバラツキが見られるものの図中の傾き 45° の直線の周りに分布している。一方, 落下実験に供した 107 個体の平均殻高 3.98 cm を使って (15) 式から落下終速度を計算すると 12.9 cm/s を得る。この値は実験によって求めた稚貝 107 個体の平均落下終速度 12.9 cm/s と一致する。このことから, (15) 式は個々の稚貝の落下終速度を求めるには適しないが多数の稚貝の平均的な落下終速度を求めるには十分な式であることが分かる。

次に, 稚貝モデルを使った流水中の落下実験で測定した着底位置の  $y$  座標と水平落下速度を  $V_0$  と見なした時の次式

$$y = V_0 t \quad (22)$$

で求まる  $y$  座標 (水平落下距離) の比較を Fig. 16 に示す。時間  $t$  の値としてストップウォッチで

Table 2. Calculated values of sinking speeds and sinking distances in  $z$  direction and  $y$  direction under conditions of  $H_s=4.16$  cm,  $V_0=11.5$  cm/s and 51.9 cm/s,  $V_{zi}=0$  cm/s,  $V_{zi}=0$  cm/s,  $k=1.63$ /cm ( $C_d=2.0$ ) and 0.407/cm ( $C_d=0.5$ ),  $V_t=13.5$  cm/s ( $C_d=2.0$ ) and 27.0 cm/s ( $C_d=0.5$ ).

Elapsed time (sec)	$z$ direction				$y$ direction							
	$C_d=2.0$		$C_d=0.5$		$C_d=2.0$				$C_d=0.5$			
	$V_t=13.5$		$V_t=27.0$		$V_0=11.5$		$V_0=51.9$		$V_0=11.5$		$V_0=51.9$	
	$V_z$	$z$	$V_z$	$z$	$V_y$	$y$	$V_y$	$y$	$V_y$	$y$	$V_y$	$y$
(cm/s)	(cm)	(cm/s)	(cm)	(cm/s)	(cm)	(cm/s)	(cm)	(cm/s)	(cm)	(cm/s)	(cm)	
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.01	2.9	0.0	3.0	0.0	1.8	0.0	23.8	0.1	0.5	0.0	9.1	0.0
0.02	5.6	0.1	5.8	0.1	3.1	0.0	32.6	0.4	1.0	0.0	15.4	0.2
0.03	7.8	0.1	8.6	0.1	4.1	0.1	37.2	0.8	1.4	0.0	20.1	0.4
0.04	9.5	0.2	11.2	0.2	4.9	0.1	40.1	1.2	1.8	0.0	23.8	0.6
0.05	10.8	0.3	13.5	0.4	5.6	0.2	42.0	1.6	2.2	0.1	26.7	0.8
0.06	11.7	0.4	15.6	0.5	6.1	0.2	43.4	2.0	2.5	0.1	29.0	1.1
0.07	12.3	0.5	17.5	0.7	6.5	0.3	44.4	2.4	2.8	0.1	31.0	1.4
0.08	12.7	0.7	19.1	0.8	6.9	0.4	45.2	2.9	3.1	0.1	32.6	1.7
0.09	13.0	0.8	20.4	1.0	7.2	0.4	45.9	3.3	3.4	0.2	34.0	2.1
0.10	13.2	0.9	21.6	1.3	7.5	0.5	46.4	3.8	3.7	0.2	35.2	2.4
0.15	13.5	1.6	25.1	2.4	8.5	0.9	48.1	6.2	4.7	0.4	39.4	4.3
0.20	13.5	2.3	26.3	3.7	9.1	1.3	49.0	8.6	5.6	0.7	42.0	6.3
0.50	13.5	6.3	27.0	11.8	10.4	4.3	50.7	23.6	8.1	2.8	47.4	19.9
1.0	13.5	13.1	27.0	25.3	10.9	9.7	51.3	49.2	9.5	7.2	49.6	44.3
2.0	13.5	26.6	27.0	52.3	11.2	20.8	51.6	100.6	10.4	17.3	50.7	94.5
3.0	13.5	40.1	27.0	79.3	11.3	32.0	51.7	152.3	10.7	27.8	51.1	145.5
4.0	13.5	53.6	27.0	106.3	11.3	43.3	51.7	204.0	10.9	38.7	51.3	196.7
5.0	13.5	67.1	27.0	133.3	11.4	54.7	51.8	255.8	11.0	49.7	51.4	248.0
6.0	13.5	80.6	27.0	160.3	11.4	66.1	51.8	307.6	11.1	60.7	51.5	299.5
7.0	13.5	94.1	27.0	187.3	11.4	77.5	51.8	359.4	11.2	71.9	51.6	351.0
8.0	13.5	107.6	27.0	214.3	11.4	88.9	51.8	411.2	11.2	83.0	51.6	402.6
9.0	13.5	121.1	27.0	241.3	11.4	100.4	51.8	463.0	11.2	94.3	51.6	454.2
10.0	13.5	134.6	27.0	268.3	11.4	111.8	51.8	514.9	11.3	105.5	51.7	505.8

計測した稚貝モデル個々の落下所要時間を代入した。図から明らかなように、プロット点にはバラツキはあるもののほぼ傾き  $45^\circ$  の直線上に乗っている。このように、(22) 式は必ずしも実験結果と良く合っていないが、その計算値が実験値に近いことから稚貝放流時の平均的は水平落下距離の推定式として十分適用できるものと思われる。

#### 着底位置の推定例

以上の実験結果とその考察から、ホタテガイ稚貝放流時における稚貝の着底位置を推定する。

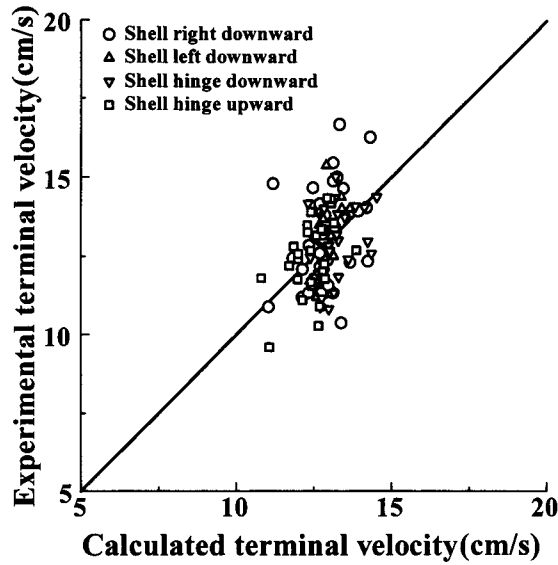


Fig. 15. Comparison of experimental terminal velocity and calculated terminal velocity given in Eq.(15) with  $C_d=2.0$ .

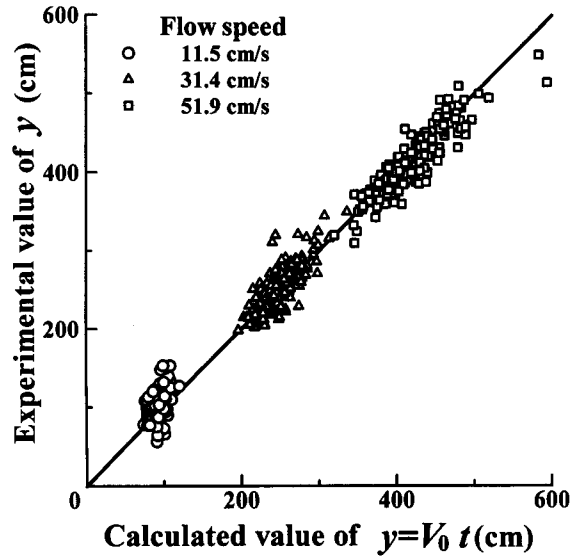


Fig. 16. Comparison of experimental and calculated  $y$  distances.

放流時の条件

- 1) 1カゴの稚貝の個数: 2,000個    1船のカゴの数: 360カゴ (稚貝数 720,000個)
- 2) 稚貝の大きさ: 2.5~5.0 cm    平均殻高: 4.0 cm

山本ら：ホタテガイ稚貝放流時の着底位置の推定

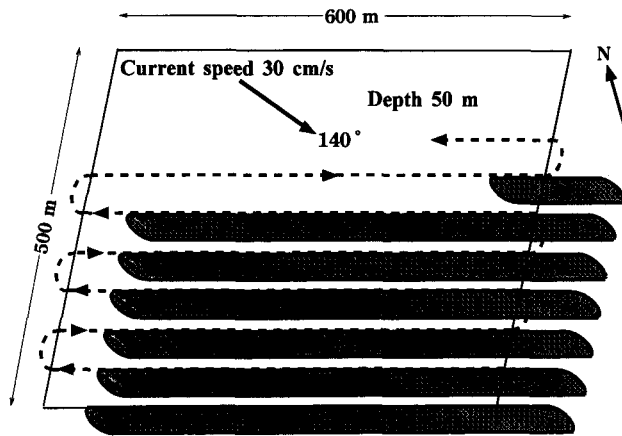


Fig. 17. Estimated seabed distribution of scallop juveniles sowed at the sea surface. Dashed line represents boat course. Large arrow represents current direction.

- 3) 船速：8～10 ノット 平均船速：9 ノット (450 cm/s)
- 4) 1 船の放流に要する時間：15 分 (=900 秒)
- 5) 1 区画：500 m×600 m
- 6) 船の航走方法：区画線に平行に航走し隣の区画との境界線で U-ターンして先の航走線から 50 m 離れて区画線に平行に逆向きに航走することを繰り返す。
- 7) 航走距離：4.5 m×900 秒=4,050 m
- 8) 水深：50 m
- 9) 流速：30 cm/s (海面から海底まで一定とする) 流向：140° (同様に一定)

推定値の計算

- 1) 落下終速度：

$$V_t = \sqrt{\frac{2 \times 2.17 \times 980}{2 \times 1.03 \times 12.5}} = 12.9 \text{ (cm/s)}$$

- 2) 落下所要時間：

$$t = \frac{5,000}{12.9} = 388 \text{ (sec)}$$

- 3) 標準偏差：

水深が 50 m であるから，(6), (7) 式を適用してその 50 倍の値をとるものとする。

$$\sigma_x = 12.6 \times 50 = 6.3 \text{ (m)}$$

$$\sigma_y = 26.4 \times 50 = 13.2 \text{ (m)}$$

- 4) 平均着底位置：

$$x_m = 0 \text{ (m)}, y_m = 30 \times 388 = 116.4 \text{ (m)}$$

- 5) 着底位置の分布楕円：

$$\frac{x^2}{(12.6)^2} + \frac{(y-116.4)^2}{(26.4)^2} = 1$$

### 着底位置推定図

求めた分布楕円を使ってホタテガイ稚貝放流時の着底位置の推定図を描くと、Fig. 17 に示すように、116.4 m 潮下側に短径 12.6 m、長径 26.4 m の分布楕円を航跡に沿って平行に移動したものとなり、この帯状の着底分布領域の総面積は 112,500 m<sup>2</sup> となる。したがって、単位面積当たりの平均稚貝数は  $(720,000 \times 0.90) / 112,500 = 5.8$  個/m<sup>2</sup> となるが、着底位置の分布が正規分布となることから帯の中心に近いほど稚貝密度は大きくなる。

### 結 び

以上、本研究では生きたホタテガイ稚貝を使った静水中の落下実験と稚貝モデルを使った流水中の落下実験の結果からホタテガイ稚貝放流時の着底位置の推定方法について詳しく述べた。本研究がホタテガイ放流事業の 1 指針となれば幸いである。最後に本実験に協力を頂いた漁具設計学講座学生梅津智弥君 (平成 10 年 3 月卒業) に対し感謝申し上げる。

### 文 献

- 江幡恵吾, 瀬戸雅文, 櫻井 泉, 梨本勝昭 (1999). ホタテガイの流れや波浪による移動時における流体力特性に関する研究. 日本水産工学会, 36, 29-36.  
小平吉男 (1931). 物理数学 第 1 巻. 岩波書店, 東京.