

流動場でのホタテ貝の挙動に関する実験的研究

Experimental study on the behavior of scallops in flow field

山下 俊彦* 星 秀樹** 和田 彰*** 櫻井 泉**** 瀬戸 雅文*****

Toshihiko Yamashita, Hideki Hoshi, Akira Wada, Izumi Sakurai, Masafumi Seto

The behavior of scallops *Patinopecten yessoensis* due to current flow and oscillatory flow was experimentally studied. The conditions for incipient movement of scallop was clarified. The scallops swim downstream in the case that the velocity of current flow is less than 20cm/s, they are force to move downstream by the flow in the case that its velocity is more than 30cm/s. The experimental values measuring the movement of scallops on both smooth and rough surface fixed beds could be theoretically explained by setting C_D (drag coefficient), C_M (added mass coefficient) and μ' (coefficient of dynamic friction) to 1.0, 0.5 and 0.1 respectively. Key words: behavior of scallop, current flow, oscillatory flow

1. はじめに

ホタテガイは、北海道では最も重要な貝類の漁業資源であるが、海域によって貝の成長速度や移流分散に違いがあることが知られている。ホタテガイの成長、移動を左右する重要な要因の1つとして漁場の流れ環境が考えられる。ホタテガイは流れを利用した摂餌活動を行い、貝の成長速度への流動環境の影響が報告されている¹⁾。一方、流れ場でのホタテガイの移動については、Goshima(1994)²⁾により、流れの下流方向に能動的に移動(遊泳)することが報告されている。しかし、流動場でのホタテガイの成長、挙動についての詳細な機構については、十分には把握されていないのが現状である。そこで本研究では、ホタテガイの好適あるいは許容流動条件を把握するための第一歩として、流動場でのホタテガイの挙動を定量的に明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

1) 一方向流実験(生貝)

本実験には、1996年7月に北海道小樽市沖で採苗および育成された放流サイズ(平均殻長 $L=70\text{mm}$)および漁獲サイズ(平均殻長 $L=110\text{mm}$)のホタテガイ *Patinopecten yessoensis* を用いた。採集後の個体については、実験開始までの2週間、人工培養した植物プランクトンの一種 *Tetraselmis tetrathel* を毎日適量(1×10^4 細胞/ml)給餌しながら、水温 15°C で飼育した。本実験には、放流サイズのホタテガイに関しては、図1に示す鉛直循環式小型振動流水槽(観測部:長さ1.5m,幅0.3m,高さ0.35m)を使用し、漁獲サイズのホタテガイに関しては、図2に示す垂直循環型回流水槽(観測部:長さ2m,幅2m,高さ60cm)を使用した。これらの水槽の観測部に中央粒径1.5mmの砂を敷き、砂面が平坦になるように整地した後、濾過海水を満たし、水温を 15°C に調温した。次に、砂面上に供試個体を置き、流速5,10,15,20,30および40cm/sの流れを60分間作用させ実験を行った。なお、ホタテ貝には、外套膜上に眼点が点在するので、本実験は貝の走光性の影響を回避するため、貝の行動が目視できる程度の暗視状態(砂面直上で3.1~3.8Lx)で行った。

2) 振動流実験(死貝)

振動流実験は、図3に示すU字管振動流装置(水路幅20cm、水路高24cm、観測部長さ200cm)を使用し、底面条件としては、アクリル板(滑面)とアクリル板に粒径 $d=7\text{mm}$ の砂礫を張り付けたもの(粗面)の2つの条件で行った。使用したホタテガイは殻長 $L=64\text{mm}$ (ホルマリン固定、放流サイズ)と殻長 $L=112\text{mm}$ (ホルマリン固定、漁獲サイズ)の2種類である。また、流れの条件は、周期 $T=3.5$ 秒、流速振幅 $U_m=40\text{cm/s}, 60\text{cm/s}, 80\text{cm/s}$ の3段階で変化させ、それぞれの場合の貝の移動機構と移動速度を調べた。

* 正会員 北海道大学大学院工学研究科 (060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 学生員 北海道大学大学院工学研究科

*** 正会員 (株)建設技術研究所

**** 北海道立中央水産試験場水産工学室

***** 正会員 北海道立中央水産試験場水産工学室

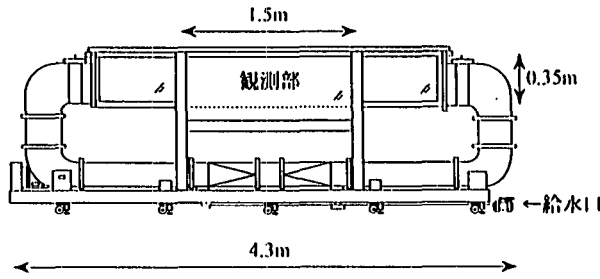


図1 鉛直循環式小型振動流水槽

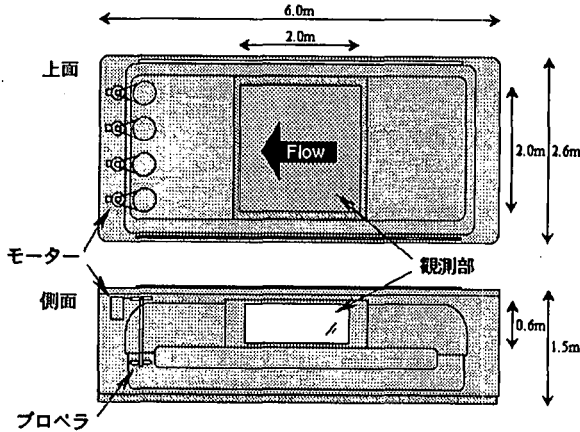


図2 垂直循環型回流水槽

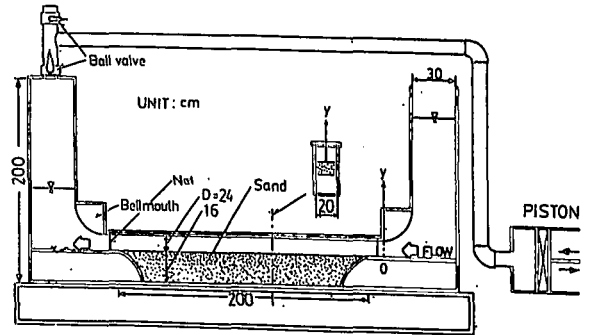


図3 U字管振動流装置

3. 実験結果及び考察

1) 一方向流実験 (生貝)

(1) ホタテガイの定位率

砂面状に配置したホタテガイは、閉殻筋を断続的に収縮することにより殻内の水を噴射し、この推進力で跳躍および回転を繰り返した後、背縁部を砂面状に差し込みながら、閉殻筋の断続的な収縮により砂面と左殻が同じ高さになるまで後退しながら潜った。その後、ホタテガイは、腹縁部周辺の砂を殻の開閉により巻き上げ、その砂で貝殻を覆い尽くした。この状態を定位状態という。ホタテ稚貝とホタテ成貝の各流速における定位率（定位した貝の割合）の違いを図4に示したが、成貝よりも稚貝の方が定位率は高い。この要因として考えられることは、稚貝の方が成貝よりも外敵（主にヒトデなど）に襲われやすく、動きが活発であるためと考えられる。また、流速が大きくなれば定位率は低くなる。グラフ上で見える限りでは、流速10～15cm/s付近でピークがあるように見えるが、本実験では、稚貝、成貝各一回しか実験を行っていないため、この点に関しては明確ではない。

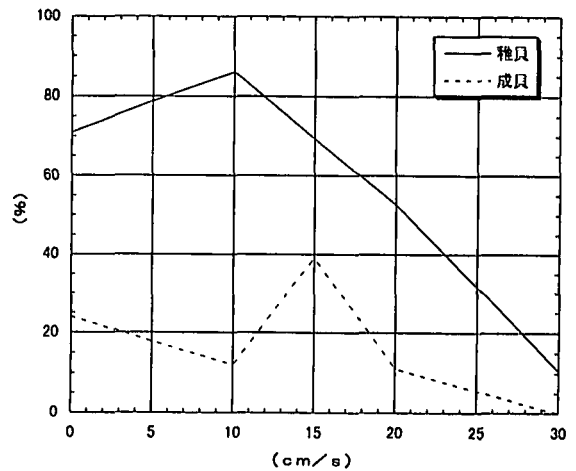


図4 ホタテガイの定位率

(2) 流れに対するホタテガイの移動方向

各流速におけるホタテ稚貝の移動個体の割合を方向別に整理したのが図5である。流速0cm/sにおいて、上流および下流に移動した個体の割合は、ほぼ同数であったが、流速5～40cm/sでは、下流方向へ移動した個体の割合が高かった。このうち、流速5～20cm/sで観測された移動は、すべて貝の跳躍による自発的な移動で

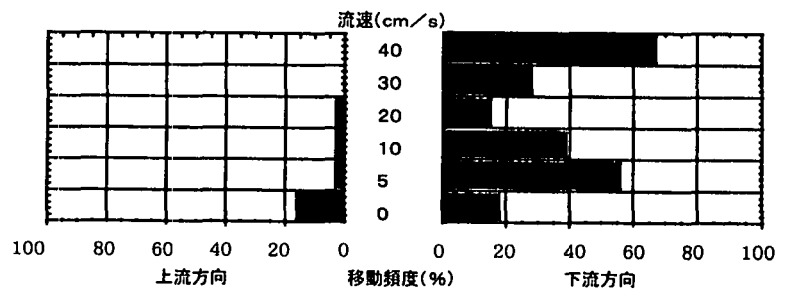


図5 各流速におけるホタテガイの移動方向

あった。また、この範囲内では、流速の上昇に伴って移動個体の割合が減少した。一方、流速 30~40cm/s で観察された移動は、すべて流れによる強制的な輸送であり、また、流速が大きい方が移動個体が多かった。

以上の結果は、北海道常呂海域のホタテガイ漁場で観測されている放流貝の下流方向への分散現象²⁾とも一致しており、放流サイズのホタテガイは、流速 5~10cm/s の範囲内では、下流方向に自発的に移動した後に定位し、流速 20cm/s では、自発的な移動の頻度は低下し、流速 30cm/s 以上になると、流れによる強制的な輸送によって下流方向に分散するものと考えられる。

2) 振動流実験 (死貝)

流速 30cm/s 以上では、ホタテガイは自発的行動はとらないことが、前述の生貝の実験で明らかとなった。そこで、振動流実験では、死貝を用いて波によるホタテガイの移動機構を調べた。

(1) 移動限界流速

振動流場における貝の移動速度を理論的に求める上では、貝の移動開始位相の見積もりが必要である。そこで、まずはじめに貝の移動限界流速を実験により求めた。ホタテガイは左右の殻が非対称であり、紫褐色を呈している左殻(表とする)に比べ、黄白色を呈している右殻(裏とする)の方が変曲度大きいという特徴がある。この為、いずれの殻が上を向いているかにより移動限界流速にも差が出る。さらに、流れ方向に対する殻の向きによっても移動限界流速が変わるので、ここでは3方向に殻を置いたときの平均の移動限界流速を求めた。殻長 $L=64\text{mm}$ のホタテガイを用いた場合の移動限界流速は、底面が粗面の時、左殻(表)が上を向いている場合で約 28cm/s、右殻(裏)が上を向いている場合は約 38cm/s であった。また、滑面の時は、表が約 20cm/s、裏が約 29cm/s であった。殻長 $L=112\text{mm}$ のホタテガイの場合、底面が粗面の時は、約 33cm/s、約 43cm/s となり、滑面の時は、約 23cm/s、約 28cm/s となった。

(2) 半周期での移動距離

図6は、粗面の時の、ホタテガイ(殻長 $L=64\text{mm}$)の半周期での移動距離の頻度分布を各流速ごとに求めたものである。上に述べた移動限界の差にもあるように、流れ作用時にどちらの殻が上を向いているかで移動形態が大きく異なる。さらに流れ方向に対する殻の向きによっても様々な挙動を示すことから、同じ流速条件下でも移動距離に大きな差が出る結果となった。各流速ごとの移動形態には次のような特徴がみられた。流速振幅 $U_m=40\text{cm/s}$ の場合、変曲度の大きい右殻(裏)が上を向いている時は、移動限界流速に近い為、ほとんど移動せず、左殻(表)が上を向いた場合では、移動する貝は、ほとんどチョーツガイを軸として起き上がるように回転して移動するものであった。 $U_m=60\text{cm/s}$ では貝の初期条件(表か裏か)の違いにより大きく二つのパターンに分けられた。流れ作用時に右殻(裏)が上を向いている場合、回転はせず、左殻(表)を底面に磨りながら移動するケースが多く観察された。その結果として移動距離も小さくなるものが多かった。逆に変曲度の大きい右殻が下を向いている場合には、流速の増加とともに揚力が貝に作用し、浮遊・回転をしながら長い距離を移動するケースが多く見られた。 $U_m=80\text{cm/s}$ では、移動形態のほとんどは右殻(裏)を上にした状態で移動した。移動距離の大きいものは、底面より数 mm 浮遊しながら滑動するケースであり、この時の移動は、 $U_m=60\text{cm/s}$ で見られたものとは異なり、底面にはほとんど触れずに浮遊しながら移動するものであった。移動距離の小さいものは、ほとんど底面に触れない浮遊状態であるが鉛直軸に対して回転しながら移動する場合と、底面に激しくぶつかりながら移動する場合である。

以上の結果より、ホタテガイの形状の特徴から、同じ流速条件下でも移動形態の違いにより移動距離にも大きな差が出るが、流速が大きくなる程、平均して移動距離も増加することが分かった。

(3) 半周期での移動速度

図7(a)(b)(c)は、底面が粗面の時、殻長 $L=64\text{mm}$ のホタテガイを用いて、半周期での移動速度の実験値と理論値を各流速ごとに比較したものである。前述の様に貝の半周期移動距離には、かなりのばらつきがあるが、移動速度の実験値としては平均半周期移動距離を移動するものを対象とした。また、図8(a)(b)(c)は、底面が滑面の時の半周期での移動速度の実験値と理論値を各流速ごとに比較したものである。。それぞれの図中には主流も示しており、時間軸のゼロは主流の反転時とした。ここで、理論値は貝を物体とみなして以下の式を用いて計算した。

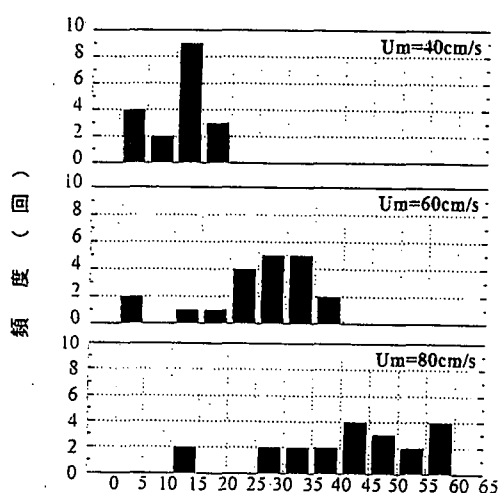


図6 半周期での移動距離

$$M \frac{dU_s}{dt} + C_{Mm} \frac{d(U_s - u)}{dt} = m \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} C_D \rho_m A |u - U_s| (u - U_s) - \mu' (M - m) g \frac{U_s}{|U_s|}$$

ここで、M:貝の質量、 U_s :貝の移動速度、 μ' :動摩擦係数、 C_D :抗力係数、 C_M :付加質量係数、A:貝の体積を球に換算した時の投影面積、m:貝が排除した流体の質量、u:水粒子の速度である。理論計算では、滑面、粗面両方とも、抗力係数 $C_D=1.0$ 、付加質量係数 $C_M=0.5$ 、動摩擦係数 $\mu' = 0.1$ を用いた。実験中貝は、前述のように種々の移動形態をとるため、それが移動速度の実験値の乱れとして現れているが、これらの値を用いると全体として理論値は実験値とよく一致することが分かる。滑面と粗面で μ' が同じになる理由としては、滑面の場合には貝は底面をするように動く割合が多く、粗面の場合には貝はサルテーション状態で動く割合が多く、結果的に両方で底面摩擦の効果が同程度になったものと考えられる。

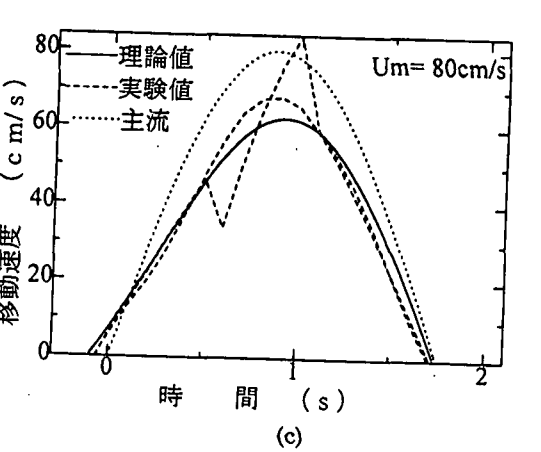
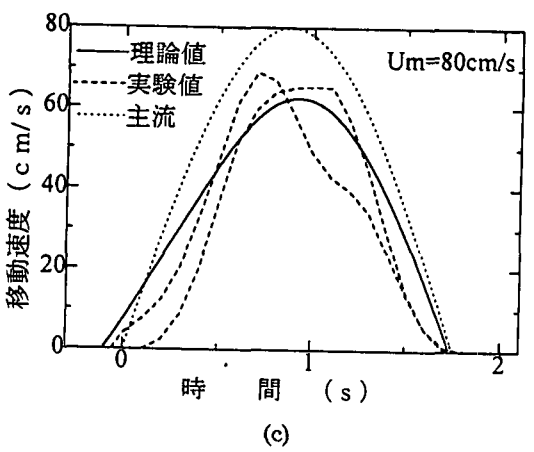
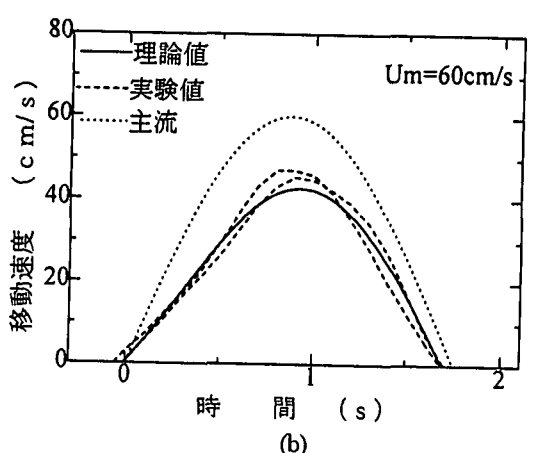
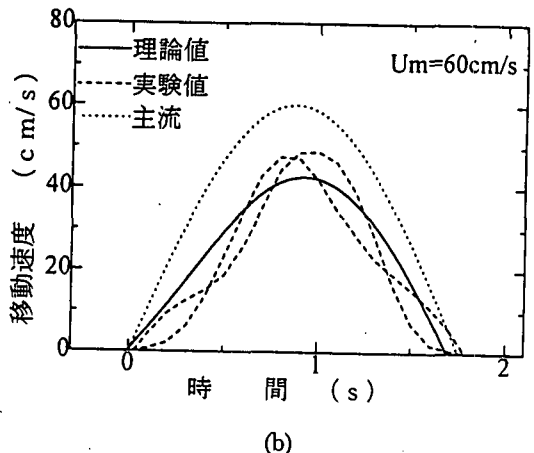
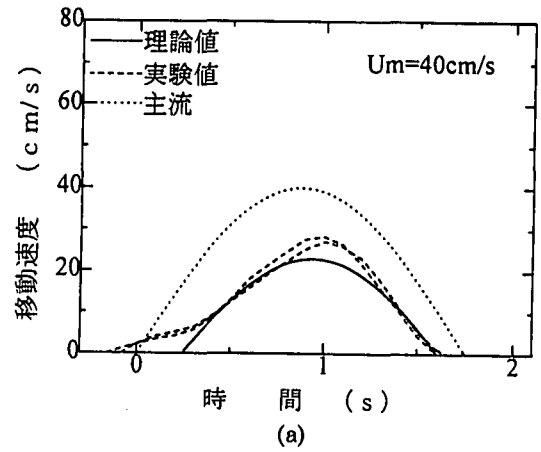
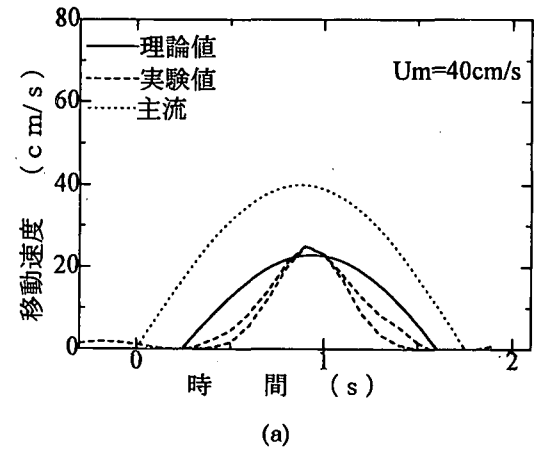


図7 移動速度 (粗面)

図8 移動速度 (滑面)

次に、殻長 $L=112\text{mm}$ のホタテガイの移動速度（滑面の場合）のグラフを図9に示す。ここでの理論計算も抗力係数 $C_D=1.0$ 、付加質量係数 $C_M=0.5$ 、動摩擦係数 $\mu'=0.1$ で行ったが実験値とよく一致していることが分かる。粗面の場合についても実験したが、殻長 $L=112\text{mm}$ のホタテガイの方が殻長 $L=64\text{mm}$ のホタテガイよりも、移動させるのに大きい流速が必要であり、同じ流速では滑らかな移動をしなかったのでここでは結果を省略する。

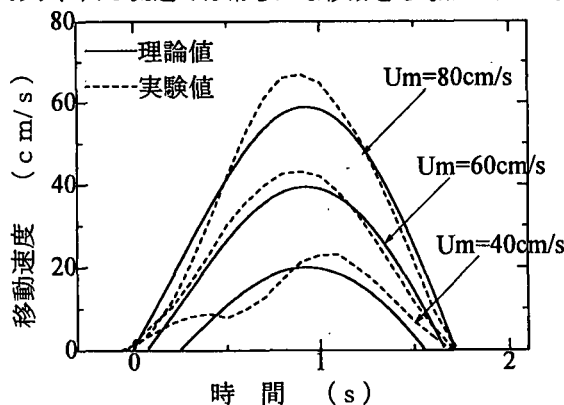


図9 移動速度（滑面）

4. 主要な結論

- (1) 定位率は稚貝よりも、成貝の方が小さく、両貝とも流速の増加とともに定位率が減少することが分かった。
- (2) 流速 20cm/s 程度までの小さな流速下では、ホタテガイは自発的に移動し、その向きは下流方向に向いていることが分かった。また、それ以上の大きな流速下では、自発的な移動をやめ、流れ方向へと強制的に移動させられることが分かった。
- (3) ホタテガイは扁平な形状をしているために流速ごとに、様々な移動形態（滑動、回転、浮遊など）が存在し、移動距離にかなり差がでるが、平均移動距離は流速とともに大きくなることを定量的に明らかにした。
- (4) 移動速度の実験結果より実験値と理論値とがほぼ一致することから、貝の体積を球に置き換えて取り扱った場合、殻長 $L=64\text{mm}$ （放流サイズ）、殻長 $L=112\text{mm}$ （漁獲サイズ）両サイズとも、 $C_D=1.0$ 、 $C_M=0.5$ 、 $\mu'=0.1$ として貝の平均的な移動速度が予測できることが分かった。

参考文献

- 1) 例えば、J.E.Eckman, C.H.Peterson, J.A.Cahalan(1989): Effects of flow speed, turbulence, and orientation on growth of juvenile bay scallops *Argopecten irradians concentricus* (Say), J.Exp.Mar.Biol.Ecol., Vol.132, pp.123-140
- 2) S.Goshoma, H.Fujiwara(1994): Distribution and abundance of cultured scallop *Patinopecten yessoensis* in extensive sea beds as assessed by underwater camera, Marine Ecology Progress Series, Vol.110, pp.151-158