



流速の波形は、対称振動流として流速  $u = U_m \sin \omega t$ 、非対称振動流として  $u = U_m(\sin \omega t - A \cos 2\omega t)$  を用いた。  $A$  が大きい程非対称性は強くなる。実験条件は表-2 に示す。

調査項目は、対称振動流場で①貝の移動限界、②貝の移動速度、③貝の半周期移動距離、非対称振動流場で④貝の正味の移動量である。貝の挙動はビデオカメラにより、撮影し解析した。流速測定はレーザー流速計を用いて行った。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 貝の移動限界

対称振動流場において、粗面上ではウバガイ、アサリ、バカガイ、ハマグリについて、滑面上ではウバガイ、アサリについて、周期 3 秒、5 秒、10 秒で、移動限界流速を測定した。貝は形状が球ではないため、振動流の流速を徐々に増やした場合初めは一方向のみに移動し、さらに増やすと両方向に移動するようになる。ここでは移動限界流速として、両方向に移動を開始する際の流速振幅とした。

振動流中の貝を動かそうとする力  $F_e$  とそれに抵抗しようとする力として貝の水中重量による力  $F_f$  の比をシールズ数  $\psi$  とし、貝の移動限界を移動限界シールズ数  $\psi_c$  で表すことを考える。まず  $\psi$  は式 (1) で定義する。

$$\psi = F_e / F_f \quad \text{..... (1)}$$

貝に働く外力  $F_e$  は抗力と流れの圧力勾配による力と付加質量力の和であり式 (2) となる。

$$F_e = \frac{1}{2} C_D \rho_w A u^2 + (1 + C_M) m \frac{du}{dt} \quad \text{..... (2)}$$

ここに、 $m$  : 貝が排除した流体の質量、 $A$  : 貝の体積を球に換算したときのその投影面積、 $\rho_w$  : 水の単位体積質量、 $C_D$  : 抗力係数、 $C_M$  : 付加質量係数、 $u (= U_m \sin \omega t)$  : 水粒子速度、 $U_m$  : 水粒子の流速振幅である。貝の水中重量力  $F_f$  は式 (3) である。

$$F_f = (s - 1) \rho_w g V \quad \text{..... (3)}$$

各周期についての移動限界流速より  $F_e$  の最大値  $F_{emc}$  を求め、

$$\psi_c = F_{emc} / F_f \quad \text{..... (4)}$$

により移動限界シールズ数  $\psi_c$  を求めた。後述する様に  $C_D = 1.0$ 、 $C_M = 0.5$  とした。

移動限界シールズ数  $\psi_c$  は、ウバガイでは粗面上で 0.58、滑面上で 0.46、アサリでは粗面上で 0.37、滑面上で 0.34、バカガイでは粗面上で 0.76、ハマグリでは粗面上で 0.47 となった。なお、周期による移動限界シールズ数の差異はほとんどなく、各周期について平均値をとり移動限界シールズ数とした。移動限界時に貝は回転して移動を開始するため、この  $\psi_c$  の値の差は、貝の形状、重

表-2 実験条件

|                       | $T$ (s) | $U_m$ (cm/s)            | $A$                               | 底面の粗滑 | 用いた貝                     |
|-----------------------|---------|-------------------------|-----------------------------------|-------|--------------------------|
| 対<br>称<br>振<br>動<br>流 | 3       | 20, 40<br>60, 80<br>100 | 0                                 | 粗・滑   | ウバガイ、アサリ<br>ハマグリ<br>エゾバカ |
|                       | 5       | 20, 40<br>60, 80<br>100 | 0                                 | 粗・滑   | ウバガイ、アサリ<br>ハマグリ<br>エゾバカ |
|                       | 7       | 20, 40<br>60, 80<br>100 | 0                                 | 粗・滑   | ウバガイ、アサリ<br>ハマグリ<br>エゾバカ |
|                       | 10      | 20, 40<br>60, 80<br>100 | 0                                 | 粗・滑   | ウバガイ、アサリ<br>ハマグリ<br>エゾバカ |
| 非<br>対<br>称           | 5       | 60                      | 0, 0.05<br>0.1, 0.15<br>0.2, 0.25 | 粗・滑   | ウバガイ<br>アサリ              |

心の位置等による回転のしやすさに起因すると考えられる。粗面と滑面の違いを見てみると、アサリは粗面でも滑面の場合とそれほど  $\psi_c$  の値が変わらないのに、ウバガイでは粗面の方が 0.1 程度大きくなっている。これは、アサリの殻の表面粗度がウバガイの表面粗度に比べてかなり大きく、アサリの粗い表面にとっては 0.3 mm の砂を貼り付けた粗面もアクリル表面も滑らかなものと感じ、一方ウバガイの場合には 0.3 mm の砂が有効な粗度として働いたものと考えられる。

#### 3.2 貝の移動速度

貝の移動速度の理論値は次式を用いて計算した。

$$\begin{aligned} M \frac{dU_s}{dt} + C_M m \frac{d(U_s - u)}{dt} \\ = m \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} C_D \rho_w A |u - U_s| (u - U_s) \quad \text{..... (5)} \end{aligned}$$

ここに、 $M$  : 貝の質量、 $U_s$  : 貝の移動速度、 $\mu'$  : 動摩擦係数である。ここで問題となるのは、抗力係数  $C_D$ 、付加質量係数  $C_M$ 、動摩擦係数  $\mu'$  の見積もりと、貝の移動開始位相の見積もりである。山下ら (1995) は、振動流場での滑面固定床上の種々の殻長のウバガイ、バカガイの移動速度の実験より、周期 3 秒の場合には  $C_D = 1.0$ 、 $C_M = 0.5$ 、 $\mu' = 0.1$  で式 (1) により見積もれることを報告している。本研究では、各々の貝について種々の流れ等の条件で最も良く合うように  $C_D$ 、 $C_M$ 、 $\mu'$  を決定した。

移動開始時間については、前で求めた移動限界シールズ数  $\psi_c$  より計算した。すなわち前の半周期に移動していた貝が静止した時点で、式 (1)～(3) によりシールズ数  $\psi$  を計算し、その時点で  $\psi > \psi_c$  の場合にはその時刻を移動開始時間とし、 $\psi < \psi_c$  の場合には貝の速度  $U_s$  をゼロとし  $\psi = \psi_c$  となる時間を移動開始時間とした。以下の計算ではすべてこの方法により移動開始時間を決定した。

図-2(a), (b)に、粗面上及び滑面上の流速振幅  $U_m$  を

変化させた場合のウバガイの移動速度の実験値と理論値を比較した一例を示す。図中の移動速度に欠損があるのは振動流装置の観測部にある柱と貝が重なって貝の移動速度が求められなかった場合である。理論計算では、 $C_D=1.0$ ,  $C_M=0.5$ ,  $\mu=0.1$ とした。実験中貝は様々な方向へ回転し、それが移動速度の乱れとして現れているが、全体として理論値と実験値はよく一致していることがわかる。流速振幅  $U_m$  が大きいほど貝は早い位相から動き出すが、この移動開始位相も前述の移動限界シールズ数より推定する方法でよく説明できることがわかる。粗面と滑面を比較すると、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、滑面の場合は貝は底面をするように動く割合が多く、結果的に両者で底面摩擦の効果は同程度で  $\mu=0.1$  とした理論で実験値をよく説明できることがわかる。

図-3は、貝の移動速度への周期の影響をみるために、一例として粗面上のウバガイの移動速度を示したものである。横軸は時間  $t$  を周期  $T$  で無次元化している。この図より、周期が変化しても  $C_D=1.0$ ,  $C_M=0.5$ ,  $\mu=0.1$  とした理論で実験値をよく説明できることがわかる。この条件では周期による移動速度への影響はあまり小さくなく、貝の速度が最大に達してからはほぼ同じ移動速度である。周期が短い方が実験値、理論値とも貝は早い位相で移動を開始しているが、これは周期が短いほど流れの圧力勾配による貝に作用するが外力が大きくなるためである。

図-4は、粗面上における貝の種類による移動速度の違いを比較した一例である。図-4(a)はウバガイとハマグリ、図-4(b)はバカガイとアサリである。理論では、どの貝についても  $C_D=1.0$ ,  $C_M=0.5$ ,  $\mu=0.1$  とした。貝の移動速度と移動開始時間両方とも、実験値と理論値は4種類の貝についてよく一致しており、本研究で用いた貝の球状率の範囲の程度では  $C_D=1.0$ ,  $C_M=0.5$ ,  $\mu=0.1$  として良いことがわかる。

本研究の理論は貝の移動速度の実験値とよく一致することが確かめられたので、移動開始位相の貝の移動速度への影響を理論的に調べた結果が図-5である。この図より、移動開始位相が異なっても減速時の貝の移動速度や貝の速度がゼロとなる位相は、ほとんど変わらないことがわかる。この貝の移動速度を半周期間積分すると貝の移動距離が求まるが、移動開始位相  $t/T$  が  $0 \sim 0.1$  の範囲で変化する場合  $t/T$  が  $0.1 \sim 0.25$  の範囲で変化する場合より貝の移動距離に与える影響は小さいことがわかる。

### 3.3 貝の半周期移動距離

図-6(a), (b)に、ウバガイとアサリの半周期移動距離  $l$  の実験値と理論値を比較した一例を示す。実験では、

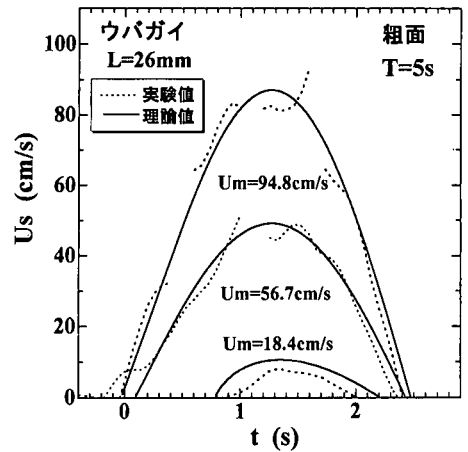


図-2(a) ウバガイの移動速度 (粗面)

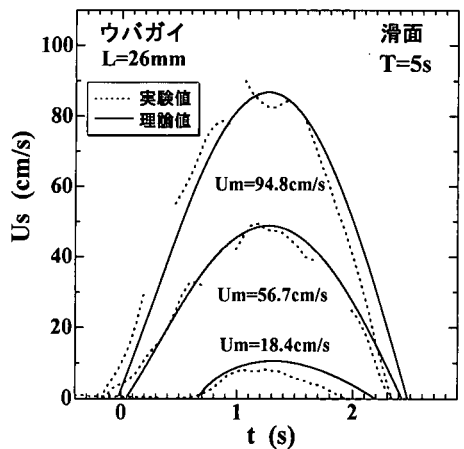


図-2(b) ウバガイの移動速度 (滑面)

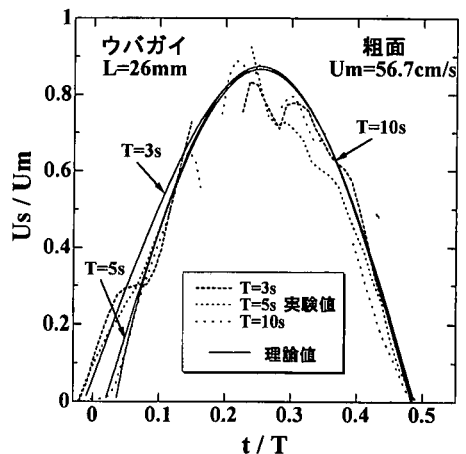


図-3 ウバガイの移動速度 (周期の影響)

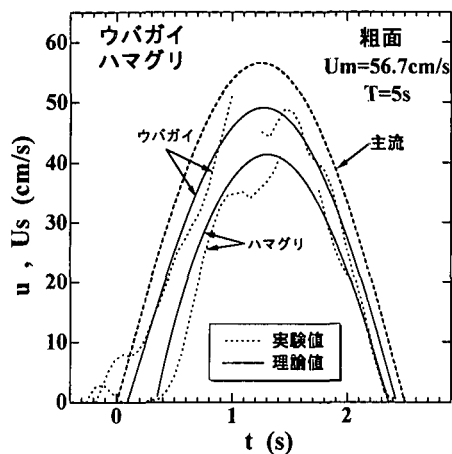


図-4(a) ウバガイとハマグリ移動速度

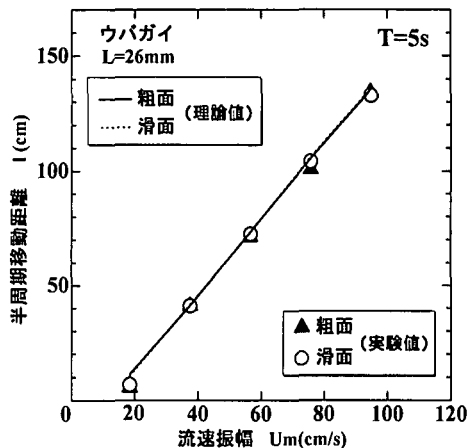


図-6(a) ウバガイの半周期移動距離

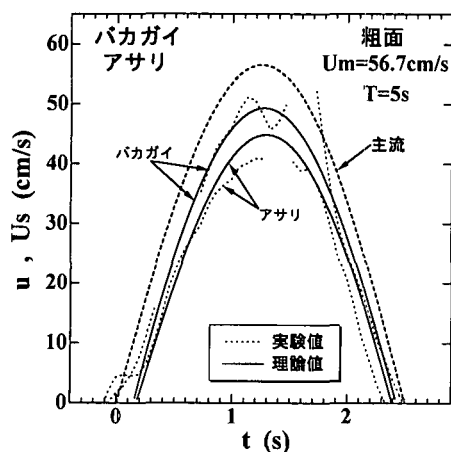


図-4(b) バカガイとアサリの移動速度

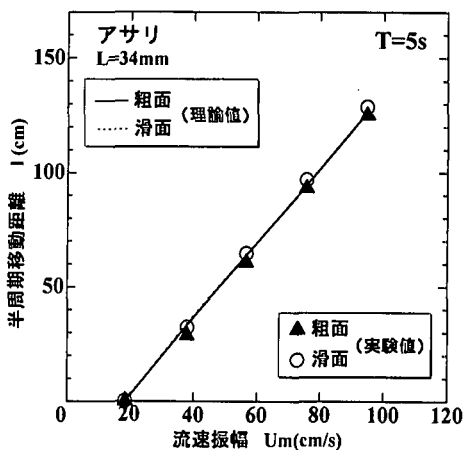


図-6(b) アサリの半周期移動距離

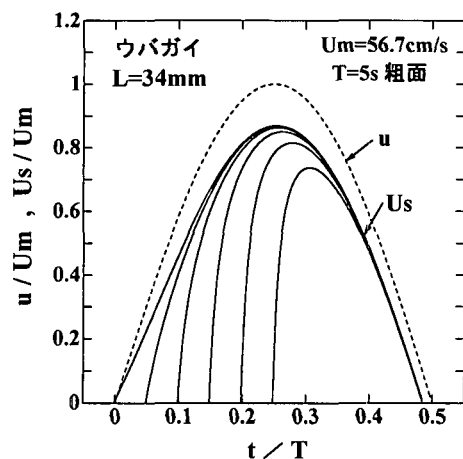


図-5 貝の移動速度への移動開始位相の影響

貝の移動状況の違いにより移動距離に1割程度のバラツキがあるが、ここでは平均値をとっている。 $C_D=1.0$ ,  $C_M=0.5$ ,  $\mu=0.1$ とした理論で、ウバガイとアサリの半周期移動距離を粗面と滑面で精度良く見積もれることがわかる。ウバガイ、アサリ共ある移動限界流速があり、限界流速を超える流れではほぼ直線的に移動距離  $l$  が増加することがわかる。理論で粗面と滑面で異なる点は移動限界シールズ数の値のみであるが、移動距離  $l$  へのこの影響はほとんどないことがわかる。また、実験値でも粗滑の差はほとんどない。

図-7に半周期移動距離  $l$  への周期の効果を調べた一例を示す。滑面の周期  $T=7$  秒と10秒の実験値が理論値と少しずれているが、今回の理論で周期が変わっても精度良く貝の半周期移動距離を見積もれることがわかる。

### 3.4 貝の正味の移動距離

図-8に、非対称振動場のアサリの半周期移動距離  $l$  及び正味の移動距離  $\Delta l$  の結果を示す。非対称性は  $A$  が

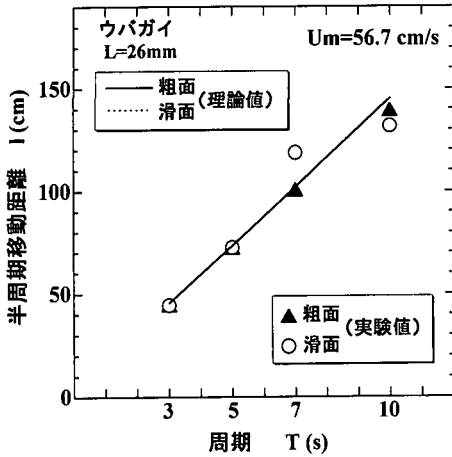


図-7 半周期移動距離への周期の影響

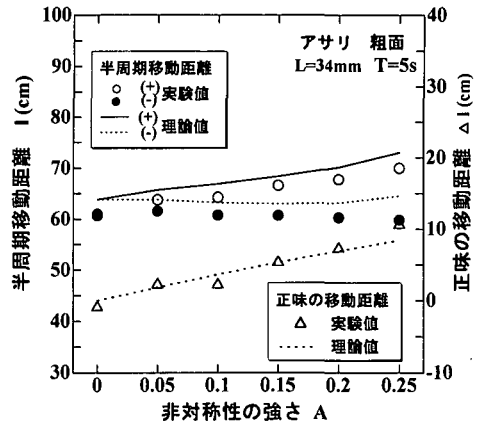


図-8 アサリの正味の移動距離

大きい程強くなる。 $A$ が大きい程最大流速が大きくなる半周期（図中○）で移動距離が大きくなること、逆の半周期（図中●）で $A$ が大きくなってあまり移動距離が小さくならないこと、その結果として正味の移動量は $A$ が大きい程大きくなることが実験値及び理論値からわかる。 $C_D=1.0$ ,  $C_M=0.5$ ,  $\mu=0.1$ とした理論で、非対称振動流場の半周期移動距離、正味の移動距離も精度良く推定することができるがわかる。

#### 4. 主要な結論

本研究で得られた主要な結論は以下の様である。

(1) ウバガイ、アサリ、バカガイ、ハマグリに関し、移動限界シールズ数を明らかにした。また移動開始時間は移動限界シールズ数より計算した位相とほぼ一致した。

(2) 移動開始後の貝の移動は、本研究で用いた貝の形状（クラムバイン球状率=0.7程度）では、流速振幅、

周期、底面の粗滑によらず、抗力係数  $C_D=1.0$ 、付加質量係数  $C_M=0.5$ 、動摩擦係数  $\mu=0.1$  とした理論で、ほぼ実験値を説明できることがわかった。

#### 参考文献

- 桑原久美・日向野純也 (1993): 波浪による二枚貝の岸沖移動に関する解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 311-315.
- 桑原久美・日向野純也・中村義治・三村信男 (1994): 波浪による二枚貝移動予測モデルの妥当性と移動機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 376-380.
- 早瀬吉雄・宮本義憲 (1985): 海岸構造物によるホッキ貝漁場形成機構に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, No. 386, pp. 1-11.
- 山下俊彦・松岡 学 (1994): 波浪による二枚貝の挙動と減耗に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 119-122.
- 山下俊彦・和田 彰・松岡 学・谷野賢二・明田定満 (1995): 振動流場での二枚貝の挙動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第42巻 (1), pp. 506-510.
- 渡辺栄一 (1982): 波浪によるホッキガイの減耗に関する実験的研究, 北海道開発局開発局土木試験所月報, No. 351, pp. 3-15.