

二枚貝の流体力特性に関する研究

The study of hydrodynamic characteristic of bivalves

瀬戸雅文*・江幡恵吾**・邵仙玉・櫻井泉***・梨本勝昭**

Masabumi Seto, Keigo Ebata, Shau Xianyu, Izumi Sakurai and Katsuaki Nashimoto

For bivalves under sand (surf clam (*Pseudocardium sybilla*), sunray surf clam (*Macra chinensis carneopicta pilsbry*) and great northern tellin (*Peronidia venulosa*)) and the bivalve on sand (scallop (*Patinopecten yessoensis*)), form factors (e.g., projective area and volume), drag coefficient, lift coefficient and added mass coefficient were measured. Exposed bivalves that are commonly found under sand are most hydrodynamically stable when horizontal currents flow at a 45 degrees angle determined. For the scallop, based on the balance condition of the rolling moment if the main force is lift force and the top is the trailing edge, the critical flow conditions of the habitat can be determined.

Keywords: bivalve, drag coefficient, lift coefficient, added mass coefficient

1. はじめに

近年、環境と調和した海岸施設の設計や自然環境の修復を目的として、二枚貝のZonationの解明や漁場形成技術の開発に向けた研究が進展し、二枚貝の潜砂能力や波浪による移動特性が物理モデル・行動実験の両面より検討され、波浪に伴う海底地形の変動に対する稚貝の潜砂耐性（流出・埋没条件）や砂中より流出後の底層流による移動限界流速値、更に移動稚貝の分散モデルなどが提案されている。砂浜性二枚貝は潜砂能力の有無により表在性二枚貝と潜砂性二枚貝に大別されるが、初期移動の限界流速値はホタテガイなど表在性二枚貝にとっては生息を規定する主外因となり、潜砂性二枚貝においても、潜砂深度の小さい（流出と再潜砂を繰返す）稚貝期においては移動分散を規定する主要因となる。二枚貝の移動条件は、力学的に検討することが可能であり、桑原ら¹⁾はホルマリン固定したウバガイを用いて貝の形状を球で近似した上で運動方程式で評価することにより移動予測モデルを提案した。また山下ら^{2),3)}は、同手法をバカガイ、アサリ、ハマグリ及びホタテガイにも適用し、何れも貝の流体力係数を球の値（ $C_D=1$ 、 $C_M=0.5$ ）で与えることにより、初期移動後の貝の運動を推定できることを示した。しかしながら、球の流体力係数値をもって、種毎に形状の異なる貝の初期移動限界流速値を推定することは物理的に不合理であるとともに、二枚貝の種別の流体特性値の違いが、砂浜域における生息水深の違いなど生態特性を規定していることも考えられる。本研究は、二枚貝の初期移動限界条件を物理的に検討する際に重要となる流体力特性値（射影面積、排除水質量、水中重量、 C_D 、 C_M 等）を直接計測するとともに、表在性二枚貝と潜砂性二枚貝の流体力学的な特性について検討する。

2. 実験装置及び方法

2-1. 供試個体

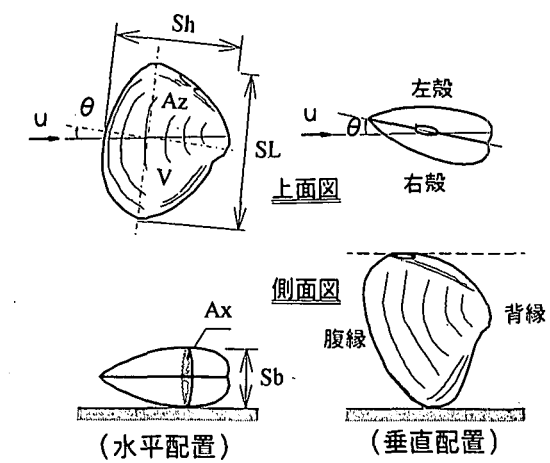
本実験には、1996年10月に北海道苫小牧沖で採取されたウバガイ（殻長33.7～109.1mm）、バカガイ（31.8～76.2mm）サラガイ（78.8～102.6mm）、及び同年北海道小樽市沖、伊達市沖で採取されたホタテガイ（殻高55～151.4mm）を使用した。図-1に潜砂性二枚貝の計測部位の定義、表-1に供試貝の体計測結果を示す。供試生貝はデジタルバギスで殻長(SL)、殻高(Sh)、殻幅(Sb)を計測後、電子天秤を用いて空中重量(Wa)および海水中的重量(Ww)を測定し排除水質量(m)及び殻内含水率を計算した。また、射影面積(A)については、図-1に示すように殻長方向の法線が主流と交わる角度を迎え角(θ)と定義した上で、殻長方向を底面と水平に配置した場合、更に潜砂性二枚貝については殻長方向を底面と垂直に配し、前縁より背縁に及ぶ縁辺部の接線が底面と平行になるように（二枚貝の潜砂行動開始時の状態で）配置した場合について、各 θ を0～ 2π まで $\pi/4$ 刻みで回転させ、主流方向よ

* 正会員 北海道立中央水産試験場 水産工学室 (046 北海道余市郡余市町浜中町238)

** 北海道大学水産学部 海洋生産システム学科

*** 北海道立中央水産試験場 水産工学室

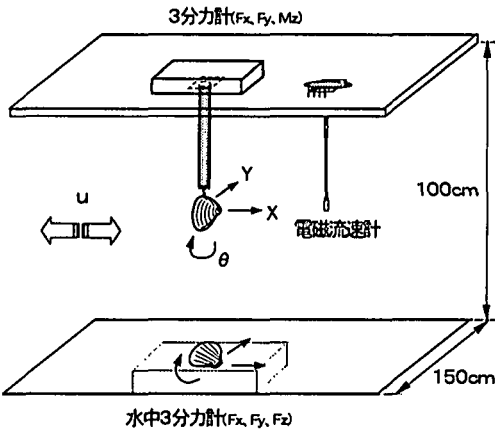
り貝殻をビデオ撮影後、2 値化処理を施した投影部の面積を画像計測することにより求めた。今回実験に使用した貝のグラム・イン球状率 (= (殻高/殻長)² × (殻幅/殻高)^{1/3}) は0.55 (サラガイ) から0.77 (ウバガイ) まで広範囲に及んでいる。



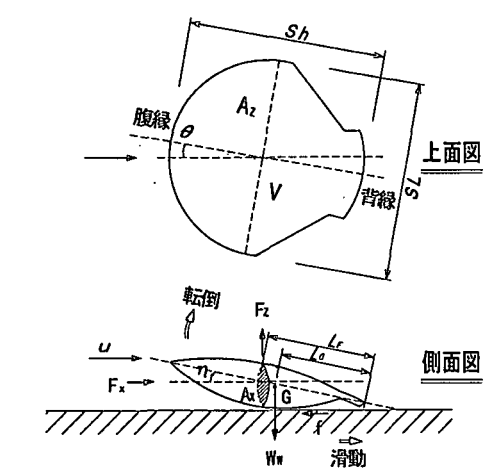
図－1 潜砂性二枚貝の諸元

2-2. 流体力計測諸元

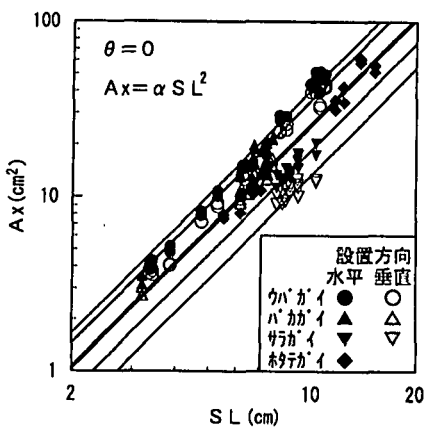
二枚貝の作用流体力の測定には鉛直循環式大型振動流水槽（水路内総水量50ton、観測部水路長8.0m、水路幅1.0m、常用水深1.0m）を使用した。本水槽は水温調節機能、濾過機能を備え、循環管路内に配置された計4枚のインパをパソコンで制御することによって最大流速±2.0m/sの範囲で任意の非定常流（振動流の最大流速振幅は周期に依存）を発生させることができる。抗力係数の測定実験は、主流流速を0～100cm/sの範囲内で23段階変化させた。また、質量力係数の測定は振動周期を6,8,10秒の正弦波形の振動流を発生させて行い、各周期に対して流速振幅を0～90cm/sの範囲内で段階的に変化させた。図－2に実験概要を示す。潜砂性二枚貝の流体力計測は、水槽上部より水路中央部に配置された三分力計（xy成分及びZ軸モーメント計測、迎え角任意設定機能付き）に貝を固定し、迎え角を0～2πまでπ/4刻みで変化させながら抗力、質量力を計測した。更に、ホタテガイについては、着底式的水中三分力計（精度1g未満）を試作し、傾斜角(η)を変化させながら垂直揚力成分についても計測した（図－3参照）。



図－2 実験概要図



図－3 ホタテガイの諸元



図－4 射影面積の殻長による変化

3. 実験結果及び考察

3-1. 形状特性係数

図-4は各供試二枚貝の迎え角 $\theta=0$ の場合における射影面積(A)の殻長(SL)による変化を示したものである。これより何れの貝においても射影面積は殻長のほぼ2乗に比例して変化し、同比例定数(α)は、サラガイ、ホタテガイ、バカガイ、ウバガイの順に0.13より0.41まで増加する。また、何れの潜砂性二枚貝においても殻長を底面と水平に配置した場合が大きな値をとる。図-5は迎え角を $0\sim\pi$ まで変化させた場合の比例定数 α の変化を示したものである。これより潜砂性二枚貝においては殻長方向を底面と水平(垂直)に設置した場合の $\theta=\pi/2$ 付近に最小値(最大値)が存在するのに対して、ホタテガイではこれとは逆位相で変化していることがわかる。また、潜砂性二枚貝において配置状況による α の変動はサラガイ、バカガイ、ウバガイの順に小さくなる。

図-6は水中重量(W_w)及び排除水質量(m)の殻長による変化をバカガイ及びホタテガイの場合について示したものである。これより、何れの貝についても W_w 及び m は殻長のほぼ3乗に比例して変化している。表-2に供試貝の形状諸元のまとめを示す。

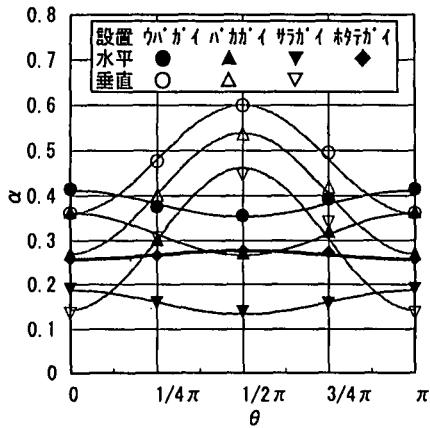


図-5 α の迎え角による変化

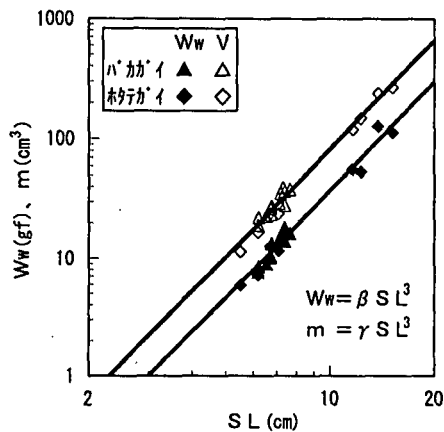


図-6 W_w 、 m の殻長による変化

表-2 供試貝の形状特性値

供 試 貝	ウバガイ	バカガイ	サラガイ	ホタテガイ
射影面積($\times SL^2 \text{cm}^2$)				
殻長水平	$0.41-0.059\sin^2\theta$	$0.36-0.094\sin^2\theta$	$0.19-0.054\sin^2\theta$	$0.26+0.020\sin^2\theta$
殻長垂直	$0.36+0.24\sin^2\theta$	$0.27+0.27\sin^2\theta$	$0.14+0.32\sin^2\theta$	$0.72(\eta=0)$
排除水質量($\times SL^3 \text{cm}^3$)	0.119	0.085	0.047	0.080
水中重量($\times SL^3 \text{gf}$)	0.076	0.038	0.039	0.036
殻内含水率(%)	57	73	50	15

3-2. 抗力係数

図-7は各供試貝を迎え角 $\theta=0$ で殻長方向が底面と水平になるように配置した場合の各供試貝の抗力係数(C_D)のレイノルズ数(Re)による変化を示したものである。これより Re 数が約30,000以上で亜臨界 Re 領域に達し、 C_D 値がほぼ一定値に収束し、ホタテガイ(0.41)、サラガイ(0.42)、バカガイ(0.57)、ウバガイ(0.61)の順に大きな値をとることがわかる。図-8は、亜臨界 Re 数領域における C_D 値の迎え角による変化を示したものである。これより、殻長方向を底面と平行に配置した場合、潜砂性二枚貝の C_D 値は θ が $3\pi/2\sim\pi$ 付近にピーク値(0.76~0.92)、 $\pi/4$ 付近に最小値

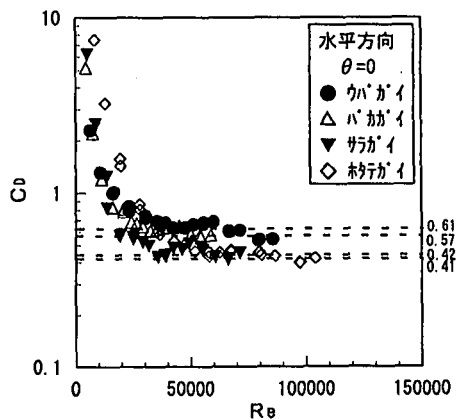


図-7 抗力係数の Re 数による変化

(0.39~0.54)を持ちながら迎え角に大きく依存して変動するのに対して、ホタテガイは θ に対してほぼ無指向性で θ によらず $C_D=0.37$ で評価できることがわかる。また、殻長方向を底面と垂直に配置した場合の C_D 値は迎え角に大きく依存しながら変動し、特にサラガイにおいては最大値と最小値に2.5倍程度の差が生じている。本結果に射影面積を考慮すれば、潜砂性二枚貝において抗力耐性面より有利な配置は、殻長方向を底面と水平に配置した場合の復縁方向より 45° 付近に認められる。図-9は、各供試貝の抗力係数とグラム・イソ球状率の関係を示したものである。これより θ の変化に伴う各供試貝 C_D の最小値はグラム・イソ球状率の増加とともに曲線的に増大し、最終的には球における C_D 値(1.0)に漸近するものと考えられるが、各貝の最大 C_D 値については同球状率で整理できないことがわかる。

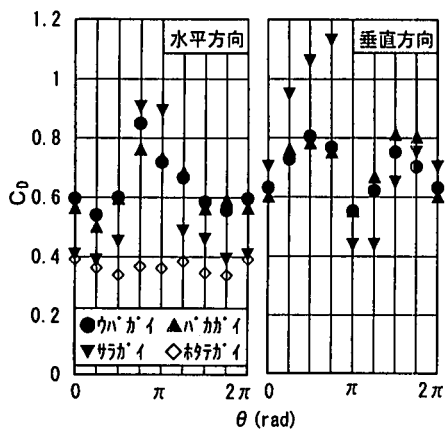


図-8 抗力係数の迎え角による変化

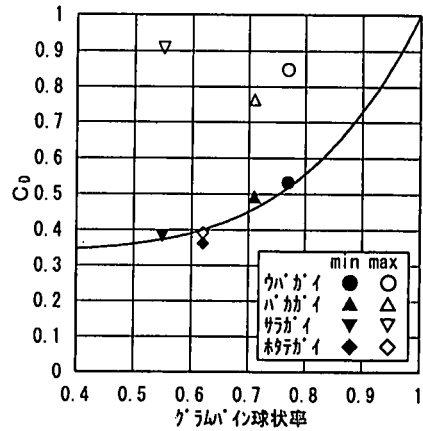


図-9 抗力係数の球状率による変化

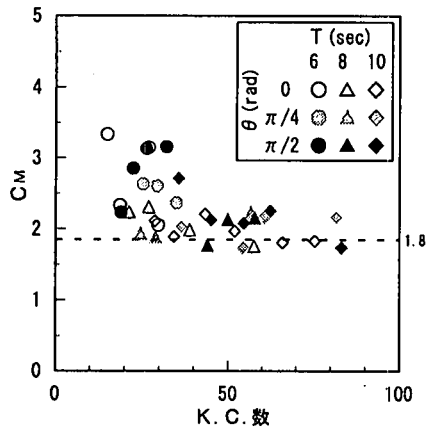


図-10 質量力係数のK.C数による変化

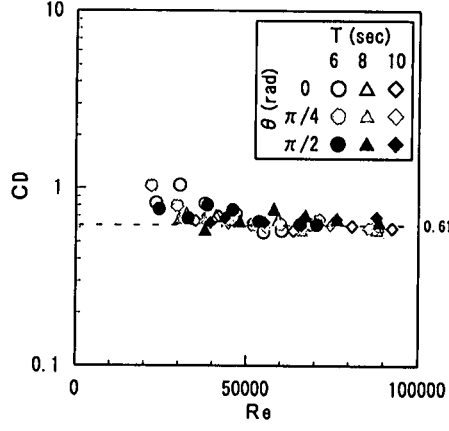


図-11 振動流場 C_D 値の Re 数による変化

3-3. 質量力係数

振動流場において殻長方向を底面と水平に配置されたウバガイの質量力係数(C_M)のK.C数による変化を、迎え角 θ 及び振動周期 T で整理して示すと図-10となる。また、同条件下における抗力係数 C_D の Re 数(流速振幅を代表流速として計算)による変化を図-11に、更に、全作用流体力における抗力成分(FD)と質量力成分(FM)の割合のK.C数による変化を図-12に示す。これより、質量力係数は迎え角によらず、K.C数の増加とともに徐々に減少しながら1.8程度の値に収束すること、及び振動流場においても C_D 値は Re 数の増加とともに定常流場と同様ほぼ0.6に収束していることがわかる。なお、抗力成分に占める質量力成分の割合はK.C数の増加とともに指数関数的に減衰しており、K.C数が比較的大きな条件(80程度以上)ではオ・グ・的に無視するこ

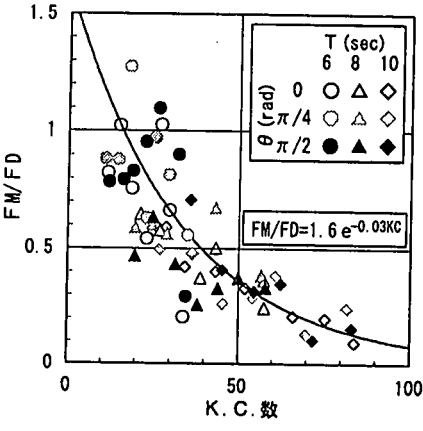


図-12 相対質量力のK.C数による変化

とができる。また、ウバガイ以外の供試貝については更にグラムハイツ球状率が小さいため、K.C数の増加に伴う質量力成分の相対値は更に小めに推移するものと考えられる。

3-4. 揚力係数

表在性二枚貝であるホタテガイは左殻表面が恒常的に底層流にさらされるため、安定条件を検討するためには鉛直方向の揚力特性を解明する必要がある。図-13は、傾斜角(η)を0とした場合の、揚力係数(C_L)のRe数による変化を迎え角をパラメータとして整理したものである。これより C_L はRe数が30,000~80,000程度では迎え角に大きく依存しながら一定値で推移し、Re数が100,000近辺に各 θ 毎のピークを形成後急速に低下する傾向を有する。図-14は C_L の迎え角 θ による変化をRe数で整理したものである。これより、ホタテガイに作用する揚力は流向で大きく異なり、背縁方向($C_L=0.055$)は最も揚力耐性に優れ、揚力係数は復縁方向($C_L=0.265$)の約1/6に留まっている。図-15は復縁($\theta=0$)方向において傾斜角(η)を変化させた場合の揚力係数の変化をRe数で整理したものである。これらよりホタテガイに作用する揚力は、復縁方向($\theta=0$)の傾斜角 $\eta=\pi/12$ 付近に最大値が存在し、この場合の揚力係数はRe数の関数として $C_{Lmax}=5.41 \times Re^{-0.25}$ で近似できる。

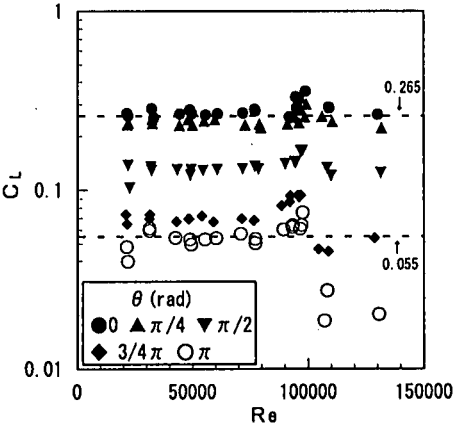


図-13 揚力係数の Re 数による変化

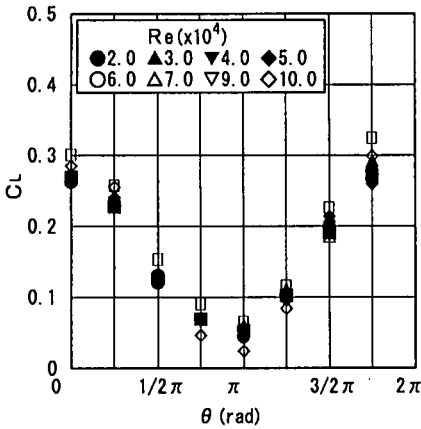


図-14 揚力係数の迎え角による変化

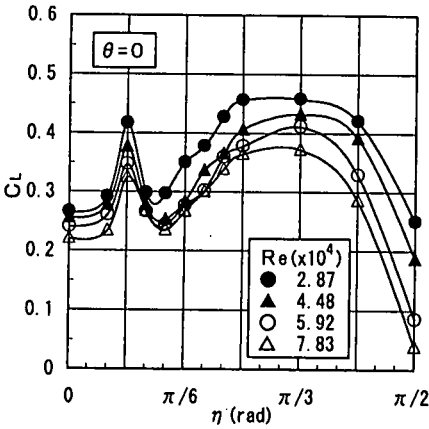


図-15 揚力係数の傾斜角による変化

4. 二枚貝の流体力特性

一度砂中より流出した潜砂性二枚貝は、殻長を底面と平行に配置した場合の殻長方向より約45° 付近が最も流体力耐性に優れており、同方向における安定条件を移動限界条件と考えてよい。また、同方向は潜砂に際して貝が斧足を出す位置とほぼ一致していることから、殻形状に起因する流体力特性と貝の行動生態とは密接に関連していることが示唆される。更に、潜砂行動に伴い同方向より殻長軸を鉛直に起こして潜入運動を開始する場合、貝殻形態より殻面が振動流の主軸方向と垂直となる（同方向特性は観測結果からも確認されている⁴⁾）が、貝の潜砂開始時の運動周期が波浪周期の約半分(5~6秒)程度⁵⁾であることに着目すれば、潜砂性二枚貝は潜砂運動時に殻面に作用する流体力を巧みに利用していることが考えられる。なお、潜砂性二枚貝については移動限界流速に関する知見が認められるが、ホタテガイについては皆無のため、以降でホタテガイの初期移動限界流速について考察する。流れによるホタテガイの移動実験結果より、ホタテガイの初期移動は滑動ではなく、背縁部を頂点とした転倒により生ずることが確かめられていることから⁶⁾、今回は、ホタテガイの転倒に対する安定条件について考察する。背縁部を頂点とした力のモーメントの釣り合い条件より、流動に対する安定条件は

$$W_w \cdot L_o > \left(\frac{1}{2} C_D \rho A_s u^2 + C_M \rho m \frac{du}{dt} \right) L_r \tan \eta + \frac{1}{2} C_L \rho A_s u^2 L_r \quad (1)$$

を満足すればよい。ここに、 u は主流流速、 L_o は背縁先端部より水中重心までの距離 ($=0.43SL$)、 L_r は背縁先端部より流体力作用中心までの距離で、殻長を代表長さとしたRe数の関数で評価できる。また添字 x, y は各

水平及び鉛直方向の成分を意味している。上式に本研究成果を代入して u について整理・簡単化すれば初期移動限界流速 u_b は殻長の関数で表現できて

$$u_b = 10.36BL^{0.40} \quad (2)$$

となる。図-16は小型回流水槽(水路幅30cm、観測部長さ150cm)底部に珪砂(砂層厚15cm、中央粒径0.38mm)を敷き、ホタテガイを流向に対して各腹縁及び背縁を向くように定位させた上で一様流速を徐々に上昇させた場合の、流れにより貝の転倒(反転移動)が生じた限界流速値を殻長で整理して示したものである。これより、振動流場におけるホタテガイの移動限界は安全側の値として復縁方向の安定条件より決定すればよいことがわかる。図-17は(2)式より計算される推定限界流速値と実験値を比較したものである。これより、推定値は実験値とほぼ一致しており(2)式の妥当性が検証された。

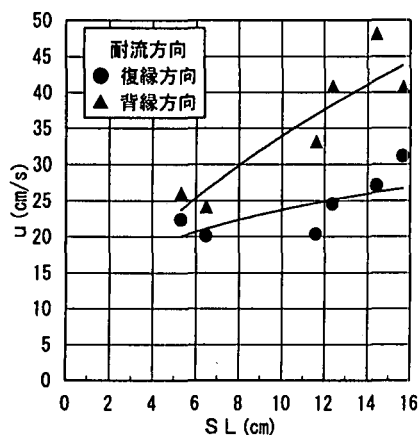


図-16 初期移動限界流速

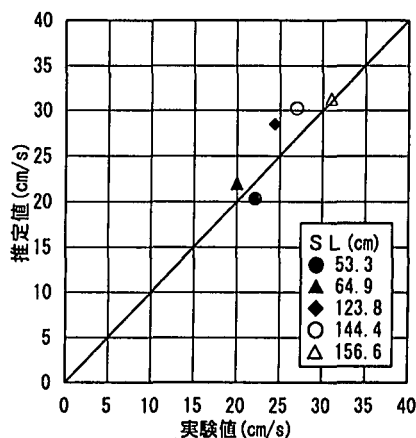


図-17 実験値と計算値の比較

5. おわりに

二枚貝の流体力特性をもとに貝固有の移動限界流速条件を検討することは、ホタテガイやウバガイなど有用二枚貝の好適放流海域の選定や生息場の造成、天然発生貝の適正管理手法など様々な環境造成手法の指針値として有用であるばかりでなく、砂浜域の水深変化など環境条件の変化に伴う二枚貝資源の種別分布特性や潜砂行動などに関わる生態学的な知見を工学的に再評価し、生物と工学の学際領域を融合化するテーマの一つとして重要である。

参考文献

- 1) 桑原久美・日向野純也・中村義治・三村信男：波浪による二枚貝の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, 41, 376-380, 1990.
- 2) 山下俊彦・山本明・和田彰・明田定満・谷野賢二：振動流場での固定床上での二枚貝の移動機構, 海岸工学論文集, 43, 1071-1075, 1996.
- 3) 山下俊彦・和田彰・木下大也・星秀樹・櫻井泉・瀬戸雅文：ホタテ貝漁場の流動条件に関する一考察, 寒地技術シンポジウム論文集, 12, 140-144, 1996.
- 4) 櫻井泉・中島幹二・山下俊彦・瀬戸雅文：振動流場におけるウバガイの潜砂行動に関する実験的研究, 平成9年度日本水産工学会学術講演会論文集, 印刷製本中, 1997.
- 5) 梨本勝昭・小島隆人・佐藤修：ウバガイの潜砂行動について, 北海道大学水産彙報, 37(3), 171-180, 1986.
- 6) 櫻井泉・瀬戸雅文・和田彰・山下俊彦：ホタテガイの流れに対する低位行動, 1996年度第10回日本ベントス学会大会要旨集, 98, 1996.