

振動流場での二枚貝の挙動に関する実験的研究

山下俊彦*・和田 彰**・松岡 学**
谷野賢二***・明田 定満****

1. はじめに

北海道沿岸の開放性砂浜域には、ホッキ貝 (surf clam), エゾバカ貝 (sunray surf clam) 等の潜砂性の二枚貝が生息し、特にホッキ貝はホタテ貝に次ぐ重要な漁業資源であり、増殖技術の開発が求められている。砂浜域に港湾を建設すると周辺の静穏域にホッキ稚貝が増加する例があること (例えば早瀬・宮本, 1985), 写真-1 の様に冬季における高波浪の後では海岸に稚貝の打ち上げがあること, 他の資源量調査 (例えば渡辺, 1980) 等から, これら二枚貝の減耗要因としては冬季の波浪による稚貝段階での減耗が重要であると考えられる。これは冬季に水温が低下したところに高波浪が作用するためと考えられる。

水温低下による二枚貝の活力低下については, 日向野ら (1993) によりチョウセンハマグリとコタマガイについて水温低下による潜砂速度の低下が定量的に明らかにされている。しかし, ここで対象としているホッキ貝とエゾバカ貝の水温低下による活力低下についてはあまり調べられていない。一方, 波浪による二枚貝の挙動については, 死貝を対象として渡辺 (1982) により二枚貝の

移動限界流速及び移動状況が二次元造波水路を用いた実験により明らかにされている。また, 桑原ら (1993, 1994) は死貝を対象として波浪による二枚貝の移動に関する理論的な予測モデルを開発し, 実験結果と比較検討している。しかし, 波動場での二枚貝生貝の挙動および減耗に関しての実験は山下ら (1994a, 1994b) 以外ほとんど行われておらず, 波による二枚貝挙動への貝の自動の効果 (潜砂等) は定量的に把握されていないのが現状である。そこで本研究では, 振動流場での二枚貝生貝の稚貝段階での挙動と水温低下による二枚貝の活力低下を実験的に明らかにする事を目的とする。

2. 実験装置及び方法

実験は, 図-1 に示すアクリル製 U 字管振動流装置を用い, 石狩浜で採取した海水を入れて行った。移動床実験では底面に粒径 0.3 mm の珪砂を厚さ 16 cm に敷き, 固定床実験ではアクリル板を用いた。実験用生貝としては, 5 mm~40 mm のホッキ貝とエゾバカ貝を用いた。流れの条件は, 周期 $T=3.03$ 秒あるいは 3.5 秒で, 流速振幅 U_m を 18 cm/s~89 cm/s の範囲で変化させた。水温は 14°C~19°C の範囲で行った。調査項目は, ①貝の移動限界 (貝が砂中より出されること), ②地形侵食速度, ③移動床砂漣上での貝の挙動, ④平坦固定床上での貝の挙動である。貝の移動限界については, 貝を自ら潜砂させた状態から振動流を作用させ, 地形変化と貝の挙動をビデオカメラにより撮影し解析した。

水温変化による貝の潜砂能力の実験は, 定温室を 20°C ~5°C まで 5°C ごとに変化させ, 海水により飼育してい

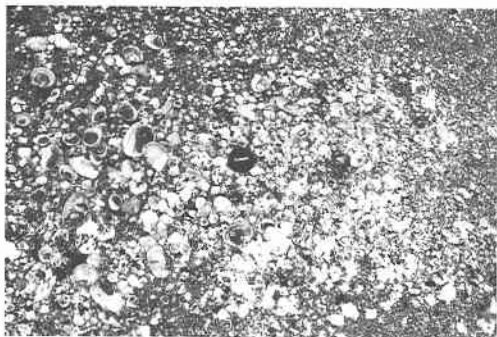


写真-1 石狩浜における稚貝の打ち上げ

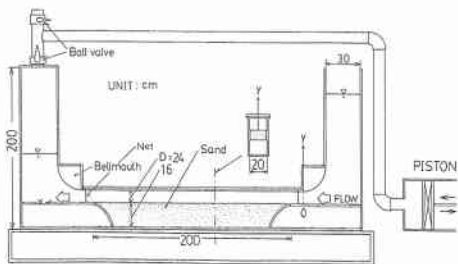


図-1 実験装置

* 正 会 員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
** 学生会員 北海道大学大学院 工学部土木工学科
*** 正 会 員 北海道開発局開発土木研究所 水産土木研究室副室長
**** 正 会 員 工博 北海道開発局開発土木研究所 水産土木研究室長

る貝の潜砂速度を測定した。潜砂実験は水温の変え方を2種類行い、現地水温が約20°Cの9月中旬に採取した貝については20°Cから5°Cへ水温を下げる条件で、水温が約5°Cの3月下旬に採取した貝については5°Cから20°Cへ水温を上げる条件で行った。各々の水温の潜砂実験は3日間貝をその温度に馴致させ、粒径0.3 mmの珪砂と粒径0.15 mmの砂で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 貝の潜砂能力

潜砂速度 V_s は、貝の殻長 L と貝が潜砂し始めてから殻長分だけ潜るまでの時間を計測し、殻長をその値で割った値とした。

図-2に、ホッキ貝について水温を20°Cから5°Cまで下げた条件での潜砂速度の実験結果を示す。図中の直線は各水温についての原点を通る重回帰直線である。この図より、各水温についてみると、殻長と潜砂速度はほぼ比例し、水温が高いほど潜砂速度が大きくなる。このことから、冬季水温下ではホッキ貝の方が活力があるものと考えられる。また、底質の違いについてみると、両貝共粒径 $d=0.15$ mmの方が $d=0.3$ mmより潜砂速度が大きくなる。

図-3に、水温を低下させる実験条件下での重回帰直線の傾き K と水温 T の関係を示す。この図より、ホッキ貝、エゾバカ貝共底質の条件に関わらず、20°C~5°Cの範

囲では水温が低下するに従って潜砂速度つまり活力が低下することがわかる。同じ底質において貝種別に潜砂速度をみると、水温10°C付近ではホッキ貝とエゾバカ貝ではほぼ同じであるが、水温が高くなるとエゾバカ貝の方が、逆に水温が低下するとホッキ貝の方が潜砂速度が大きくなる。このことから、冬季水温下ではホッキ貝の方が活力があるものと考えられる。また、底質の違いについてみると、両貝共粒径 $d=0.15$ mmの方が $d=0.3$ mmより潜砂速度が大きくなる。

図-4に、水温低下条件と水温上昇条件でのホッキ貝の潜砂速度の実験結果を示す。この図より、高水温時(20°C)では、貝を採取した時の水温と実験開始時の水温に近い水温低下条件の方が潜砂速度が大きく、逆に低水温時(5°C)では水温上昇条件の方が潜砂速度が大きくなっていることがわかる。これは、現地では徐々に水温が変化し、貝がその水温に適応するための時間的余裕があるため、潜砂速度あるいは活力が大きくなると考えられる。

3.2 貝の移動限界

図-5に地形変化と貝の挙動の実験結果の代表例を示す。図中には地形の時間的変化から計算した地形侵食速度 V_e も示してある。図-5(a)は、貝が潜砂している場

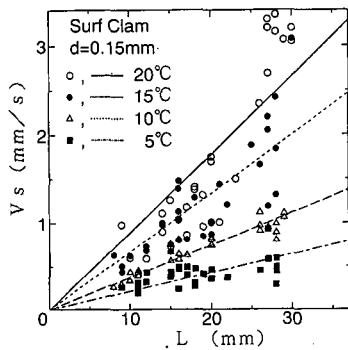


図-2 殻長と潜砂速度

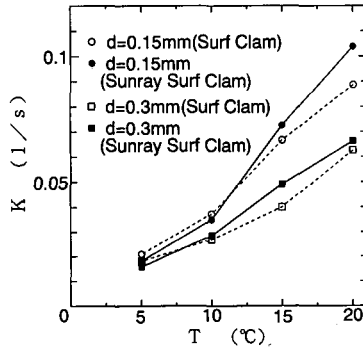


図-3 水温と比例定数 K

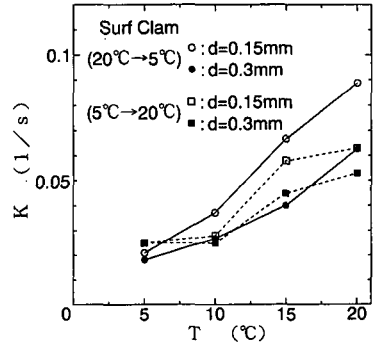
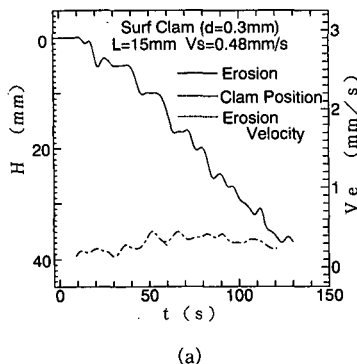
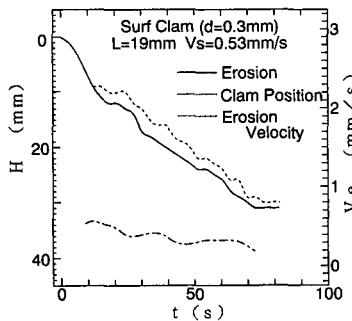


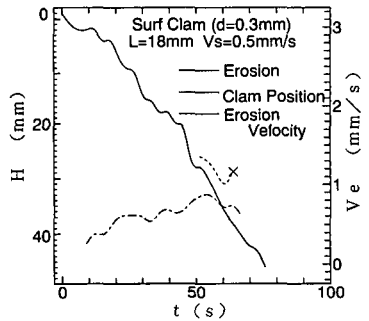
図-4 水温と比例定数 K



(a)



(b)



(c)

図-5 地形変化と貝の挙動

所での地形は侵食されたにも関わらず、貝の潜砂速度 V_s よりも地形侵食速度が小さかったため、貝はずっと砂中に留まった例である。図-5(b)は、実験の初期に貝の潜砂速度を越える地形侵食が発生したため、貝が殻長の1/5程度砂中より出されたが、その後地形侵食速度が貝の潜砂速度よりも小さくなったため、貝が砂中に留まった例である。図-5(c)は、実験初期には貝の潜砂速度とほぼ同程度の地形侵食が発生したが、この時、貝はずっと潜砂し続け砂中に留まり、実験開始後43秒から後に起こった潜砂速度を越える地形侵食により、貝は砂中より一部を出され、最終的には貝全体が砂中より水中に出された例である。図中×印で貝全体が砂中から出された時刻を示す。

図-6に貝の移動限界の実験結果を示す。図-5より、貝の移動限界(貝が砂中より出されること)は、貝の潜砂速度 V_s と貝が潜砂している所での地形侵食速度 V_e が関係していることがわかる。図-6は、横軸に地形侵食速度 V_e 、縦軸に貝の潜砂速度 V_s をとり、ある潜砂速度 V_s の貝がある地形侵食速度 V_e の侵食を受けたとき、貝全体が留まった場合には○印、貝の一部は砂中より出たが貝全体は水中に出なかった場合には●印、貝全体が水中に放出された場合には×印で示す。貝は殻長の1/2程度砂中より出されると貝全体が砂中より出され易くなる。そこで、地形侵食速度としては、貝の殻長の1/2だけ地形侵食が進む場合の平均侵食速度の、流れ作用中での最大値を採用した。この図より、 $V_e/V_s < 1.0$ の範囲では全ての貝が砂中に留まり、 $V_e/V_s > 1.3$ では全ての貝が水中に出され、 $1.0 < V_e/V_s < 1.3$ の範囲では両者が存在することがわかる。すなわち、貝の移動限界は、地形侵食速度と貝の潜砂速度の比によって決定されることがわかる。 $1.0 < V_e/V_s < 1.3$ の範囲に、砂中に留まる貝があるということは、貝は砂中から出されないようにするために、静水状態よりも流れ作用下の場合に速く潜砂する場合があることがわかる。なお、地形侵食速度 V_e は、貝の潜砂している場所ごとに異なるため、各場所での V_e は流速

振幅と比例関係にはなく、貝の移動限界を流速との関係で直接的には整理できない。また、本研究で求めた生貝の移動限界は、死貝を砂上に置いたときの移動限界よりもかなり大きく、貝の自動(潜砂)効果が大きいことがわかった。

以上では、貝の移動限界は貝が潜砂するよりも速い地形侵食が振動流により起こった場合に貝が砂中より出されることを扱ってきた。波浪により貝が砂中より出される原因には、この他に砂地盤の液状化や有効応力の減少が考えられる。砂層全体に少し上昇流を与え、模擬的に砂地盤の液状化状態を作ると、その砂中に潜砂している貝は水中に出されることがわかった。今回の実験を行った範囲において、砂地盤が液状化している際には、二枚貝は潜砂行動をとらず、貝の比重が周りの砂地盤より軽いために、浮力によって貝が砂中より出されたものと考えられる。今後、貝の移動限界への砂地盤の液状化と有効応力の減少の影響を詳細に調べる必要がある。

3.3 砂漣の形成による地形侵食速度

貝の移動限界には、地形侵食速度 V_e が関係していることが前述のように明らかとなった。貝の移動限界には、貝の殻長程度の距離を侵食する際の短時間平均の大きな地形侵食速度が重要となる。従来、一日平均以上の長時間平均の地形侵食速度は調べられているが、ここで対象としている短時間平均の地形侵食速度はほとんど調べられていないのが現状である。短時間に大きな地形侵食をもたらす波による地形変化としては、碎波の大規模渦による侵食および砂漣の形成・移動によるものが考えられる。本研究では、その第一歩として、振動流による砂漣形成時の地形侵食速度を調べた。

図-7に砂漣形成時の地形侵食速度 V_e の実験結果を示す。底面位置を3箇所、5周期(17.5s)ごとに読みとり、それを微分することにより5周期平均の地形侵食速

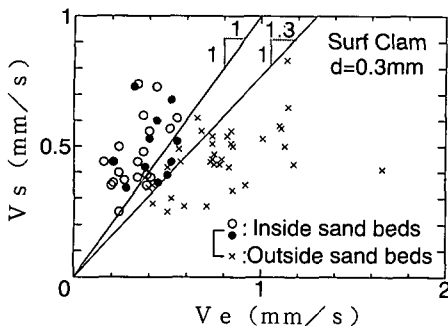


図-6 ホッキ貝の移動限界

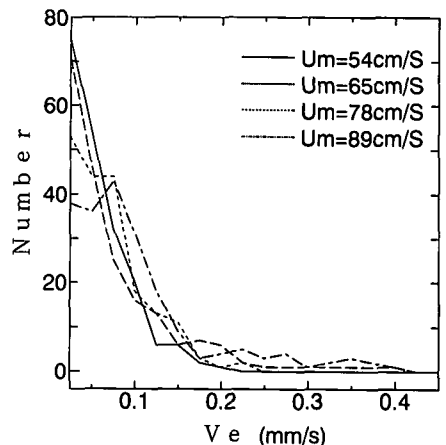


図-7 地形侵食速度の頻度分布

度 V_e の頻度分布を求めた。この図より、地形侵食速度 $V_e=0$ を頂点とした山状の分布となっていることがわかる。また、流速振幅 U_m が大きくなるに従って山の傾斜がなだらかになっている。これは、流速振幅が大きくなるに従い、地形侵食速度も大きな値を取る頻度が増すことを示す。

図-8 は、図-7 より 5%~50% までの各々の確率で起こる地形侵食速度を求め、流速振幅との関係を示したものである。この図より各々の確率に対して、流速振幅が大きくなるに従い地形侵食速度も大きくなることからわかる。

3.4 移動床砂漣上での貝の挙動

流れにより砂中より出された貝の水中での移動状況を調べた。実験は、流速振幅 45 cm/s で安定した砂漣（波長 25 cm, 波高 4.5 cm）を形成した後に、殻長 25 mm のホッキ貝を投入して行った。貝の半周期間の移動状況は、図-9 に示す 3 つのパターンに分類できる。Case-0 は、半周期の間に水中にある貝が砂漣の山を越えない場合（36%）、Case-1 は 1 つ越える場合（42%）、Case-2 は 2 つ越える場合（15%）である。貝の移動がどのパターンになるかは、貝の砂漣上での初期位置（移動前）が重要であることがわかった。また、流れにより一旦砂中から出された貝は、本研究で行った全ての実験条件（貝の移動限界の実験も含めて）の範囲では再び潜砂する事はなかった。

3.5 平坦固定床上での貝の挙動

図-10 に、平坦固定床上における貝の水中での移動速度の実験値と理論値を比較した一例を示す。理論値は貝を自動する生物としてではなく、物体として次式を用いて計算した。

$$M \frac{dU_s}{dt} + C_m m \frac{d(U_s - u)}{dt} = m \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} C_D \rho_w A |u - U_s| (u - U_s) - \mu' (M - m) g \left| \frac{U_s}{U_s} \right|$$

ここに、 M : 貝の質量、 m : 貝が排除した流体の質量、 U_s : 貝の移動速度、 u : 水粒子速度である。理論計算では、貝の流れ方向への投影面積 A は貝の体積を球に換算したその投影面積、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。図-10(a), (b), (c) は、エゾバカ貝について流速振幅を変化させた場合、図-10(d), (e), (f) は、ホッキ貝について殻長を変化させた場合である。時間軸のゼロは主流の反転時とした。図中には、実験値として異なる 3 つの半周期間の貝の移動速度がプロットされている。流れ作用中、貝はさまざまな方向に回転し、それが移動速度の実験値の乱れとし

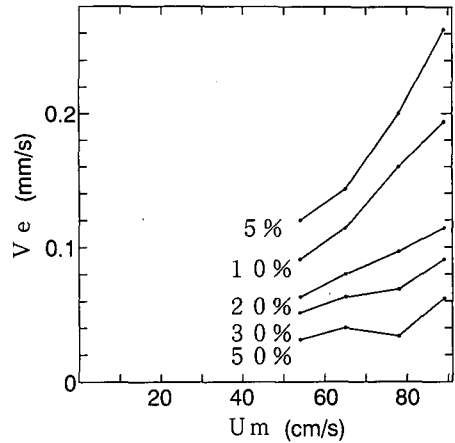


図-8 流速振幅と地形侵食速度

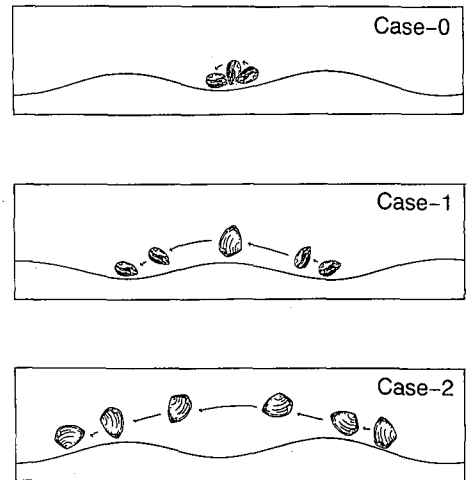


図-9 砂漣上での貝の挙動パターン

て現れているが、全体として理論値は実験値とよく一致していることがわかる。図-10(a), (b), (c) によると、流速振幅 U_m が大きいほど貝は速い位相から動き出し、貝の移動速度の最大値 U_{sm} と U_m の比は 1 に近づくことがわかる。図-10(d), (e), (f) によると、貝の殻長が大きいほど U_{sm} が少し小さくなるが、流速振幅 U_m が大きい場合貝の殻長による差は少ない。

以上のことと、前述の移動床上で一旦砂上に出された貝は再び潜砂することはないという事とを考え合わせると、一旦砂上へ出された貝の挙動について自動の効果は少なく、物体として取り扱ってよいことがわかる。

4. 結 論

本研究で得られた主要な結果は以下の様である。

(1) 貝の潜砂速度は殻長に比例し、水温 5°C~20°C の範囲では両貝共水温低下とともに潜砂速度は減少する

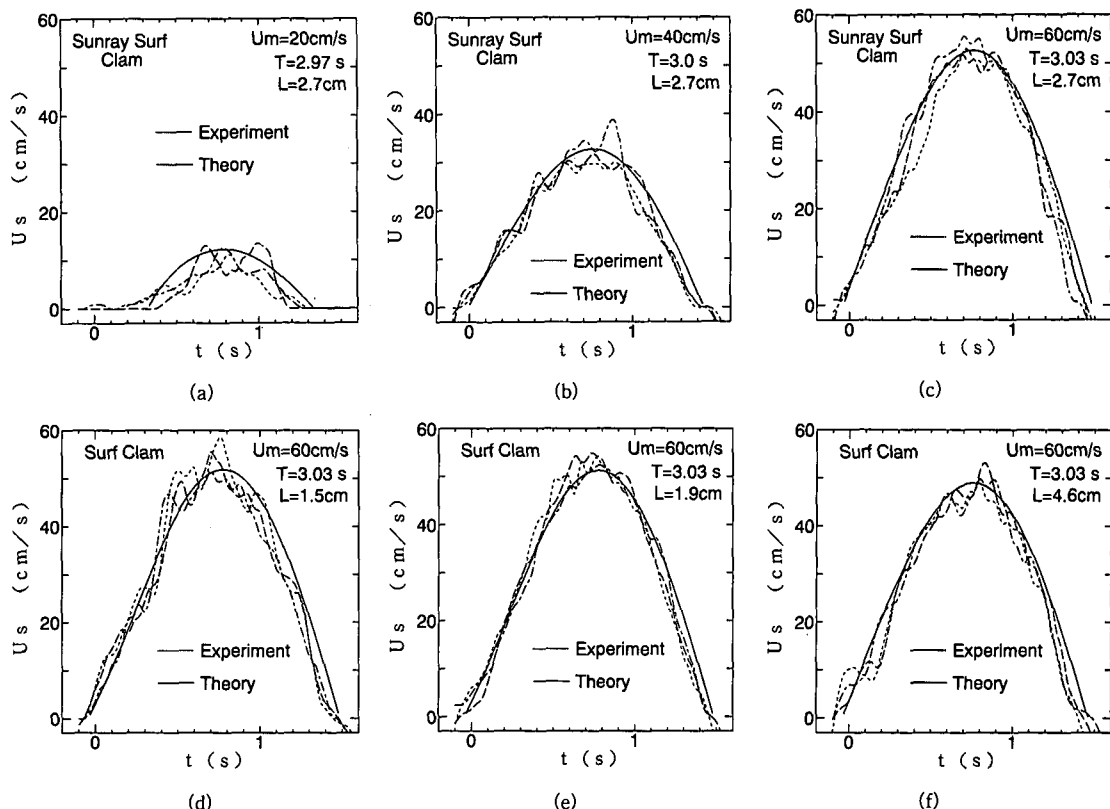


図-10 貝の移動速度

こと、同じ水温でも馴致期間が長い程潜砂速度は大きくなることがわかった。

(2) 貝の移動限界は地形侵食速度と貝の潜砂速度の比で決定され、貝が砂上に出されるまでは貝の自動(潜砂)の効果が重要であることがわかった。また、砂地盤に液状化が発生する場合には貝は浮力を受けて砂上に出される可能性があることが明らかとなった。

(3) 砂漣形成時の地形侵食速度は流速振幅が大きいほど大きくなることがわかった。

(4) 砂上に出された貝の挙動については、貝の自動の効果は少なく、物体としての取り扱いが可能であることが明らかとなった。この際、貝の体積を球に置き換えて取り扱えば、 $C_D=1.0$ 、 $C_M=0.5$ で貝の挙動を理論的に予測できることがわかった。

(5) 貝は殻長が小さい程、水温が低い程、波高が高い程砂上へ出され易く、これが冬季波浪による稚貝の減耗の重要な要因の1つと考えられる。

最後に、研究を進めるにあたり、二枚貝の生態についての助言ならびに二枚貝を提供していただいた北海道立

中央水産試験場、水産庁水産工学研究所の方々に深く感謝の意を表します。

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.
- 日向野純也・木元克則・安永義暢 (1993): 潜砂行動と物理環境の関係からみたチョウセンハマグリとコクマガイの分布特性, 水産工学研究所研究報告, No. 14, pp. 65-87.
- 山下俊彦・松岡 学 (1994a): 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・松岡 学・谷野賢二・明田定満 (1994b): 往復流場での二枚貝の挙動と減耗に関する実験的研究, 平成6年度日本水産学会学術講演会講演論文集, pp. 57-58.
- 渡辺栄一 (1980): ホッキガイの減耗と環境要因について, 北海道開発局土木試験所月報, No. 325, pp. 1-12.
- 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, 北海道開発局土木試験所月報, No. 351, pp. 3-15.