

波浪に伴うホタテガイの移動分散に関する研究

瀬戸雅文*・櫻井 泉**・吉澤 裕***
 巻口範人****・梨本勝昭*****

1. はじめに

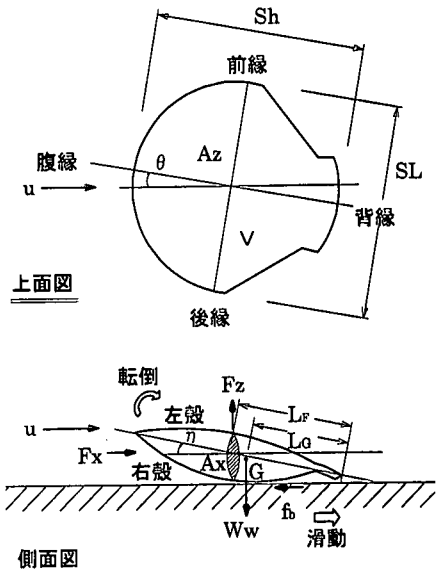
ホタテガイは、我が国の砂浜域の寒冷地における栽培漁業を代表する二枚貝であり、北海道のオホーツク海および太平洋沿岸を中心に地置き種苗放流による漁業が盛んに営まれている。高波浪に伴うホタテガイの分散・移動については、時化に伴う暴風時の卓越波向と分散方向との相関性などが放流・追跡調査結果等より指摘されているが (Miyake, 1995)、本種の波浪に伴う移動機構に関する知見が少ないため、適正な放流計画や漁場造成手法の開発が遅れている。ホタテガイなど表在性二枚貝にとって、初期移動に係わる限界流速値は直接的に生息を規定する主外因となる。ホタテガイの移動条件を力学的に検討するためには、貝の流体力特性値を適正に評価する必要がある。本研究は、ホタテガイの形状特性および流体力特性を水理模型実験より直接計測するとともに、同特性値をもとに本種の波浪による移動限界条件を明らかにする。さらに、既存のホタテガイ漁場に適用し研究成果の妥当性について検討した。

2. ホタテガイの挙動特性

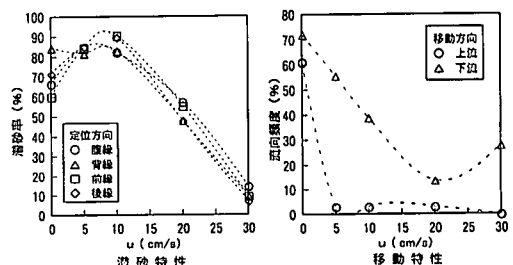
2.1 行動特性

a) 実験方法

供試貝は1996年7月に北海道小樽市沖で育成された放流サイズのホタテガイ(平均殻長6.48 cm)を水温15℃下で約1ヶ月馴致後使用した。図-1に本研究で使用したホタテガイの計測部位の定義を示す。実験には鉛直循環式回流水槽(観測部2.0 m×2.0 m, 水深0.6 m)を使用し、水槽底面に珪砂(中央粒径1.5 mm)を敷いた上で、供試貝を流れに対して前縁、腹縁、後縁及び背縁を向くように各40個体ずつ左殻を上にして配置した。主流流速を5~30 cm/sの範囲で4段階に設定し、各段階ごとに60分間作用させて流向に対するホタテガイの移動方向を記録した。



図一1 ホタテガイ諸元の定義



図一2 潜砂率及び移動方向

b) 潜砂・移動特性

砂面上に配置したホタテガイはしばらくすると殻内の海水を噴射し、砂面と左殻が同じ高さとなるまで砂中へ潜砂する。図-2はホタテガイ潜砂率の主流流速 (u) による変化、及び、砂中より放出し移動した個体の移動方向を示したものである。これより、低流速下で高い値を維持していた潜砂率は流速の上昇とともに急激に減少し、30 cm/s では1割程度まで減少する。また、主流流速 5~20 cm/s におけるホタテガイの移動は貝の跳躍によ

* 正会員	水博	北海道立中央水産試験場	水産工学会
**	水博	北海道立中央水産試験場	水産工学会
** 正会員		東海大学講師 海洋学部	海洋土木工学科
****		(社)北海道栽培漁業振興公社	企画設計課
*****	水博	北海道大学教授 水産学部	海洋生産システム学科

下流方向への自発的な移動で、移動頻度は流速の増加とともに減少しているのに対して、流速 30 cm/s における移動は流れによる強制的な輸送で、背縁部を頂点とした転倒移動がほとんどであった。なお、一度潜砂した後、同流速条件下で移動を開始する貝は観察されなかったことから、供試サイズのホタテガイは、低流速下ではほとんどが潜砂状態で定位し、流速 30 cm/s 程度以上で、大半が砂中より放出し下流方向へ落下することがわかった。

2.2 流体力特性

a) 実験方法

供試生貝は、行動特性実験と同時期に採取した小樽市沖の個体(殻長 4.63~7.08 cm)に加えて網走産の放流個体(殻長 2.07~5.77 cm)および伊達市沖で採取された天然個体(殻長 9.11~15.66 cm)の合計 137 個体を使用した。殻長 (S_L)、殻高 (S_h)、殻幅 (S_b) をデジタルノギスで計測後、電子天秤を用いて空中重量 (W_a)、海水中の重量 (W_w)、および排除水質量 (V) を計測した。また、射影面積 (A_x) の計測については、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、 θ を $0 \sim 2\pi$ まで $\pi/4$ 刻みで回転させ、主流方向より貝殻をビデオ撮影後、投影面積を画像計測した。ホタテガイ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 50 ton、観測部水路長 8.0 m、水路幅 1.0 m、常用水深 1.0 m)を使用した。本水槽は水温調節機能、濾過機能を備え、最大流速 ± 2.0 m/s の範囲内で任意の非定常流(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。

実験概要図を図-3 に示す。抗力係数の測定では、主流流速を $0 \sim 100$ cm/s の範囲内で 23 段階変化させた。また、質量力係数の測定では、振動周期が 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 $0 \sim 90$ cm/s の範囲内で段階的に変化させた。更に、波浪水槽を用いて、周期 1.5, 2.0, 2.5 秒についても

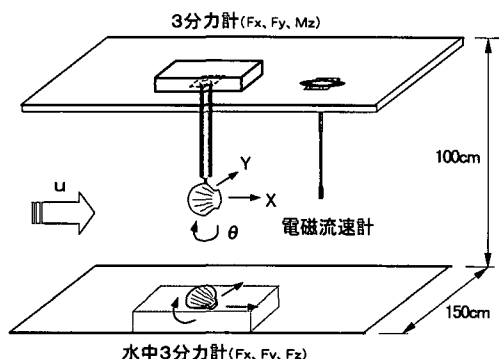


図-3 実験概要図

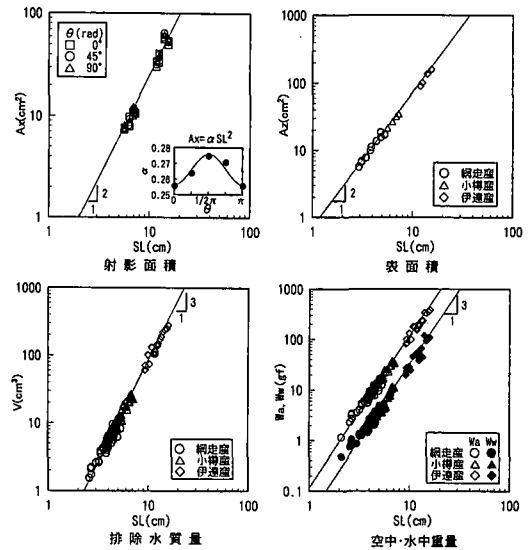


図-4 ホタテガイの形状特性

計測した。実験では、水槽上部より水路中央部に配置された三分力計に貝を固定し、迎え角を $0 \sim 2\pi$ まで $\pi/4$ 刻みで変化させながら抗力、質量力を計測した。更に、揚力については、着底式の水中三分力計(精度 1 g 未満)を試作し、傾斜角 (η) を $0 \sim \pi/2$ まで 12 段階に変化させながら計測した。計測データは何れも A/D 変換後光磁気ディスクに記録しパソコンで解析した。

b) 形状特性

図-4 はホタテガイの射影面積 (A_x)、表面積 (A_z)、排除水質量 (V) 及び、空中重量 (W_a)、水中重量 (W_w) の殻長 (S_L) による変化を示したものである。これより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) は迎え角に依存して $\theta = \pi/2$ 付近に最小値が存在するが、変動幅は α 全体の 1 割以下と迎え角による指向性がほとんど認められないことなどがわかる。ホタテガイの形状は殻長(単位: cm)の関数として各々以下の式で近似できる。

$$A_x = (0.257 + 0.020 \sin^2 \theta) S_L^2 \quad (\text{cm}^2) \quad \cdots (1)$$

$$A_z = 0.72 S_L^2 \quad (\text{cm}^2) \quad \cdots (2)$$

$$V = 0.080 S_L^3 \quad (\text{cm}^3) \quad \cdots (3)$$

$$W_w = 0.036 S_L^3 \quad (\text{gf}) \quad \cdots (4)$$

$$W_a = 0.080 S_L^3 \quad (\text{gf}) \quad \cdots (5)$$

c) 抗力特性

図-5 は各供試貝を迎え角 $\theta = 0, \pi$ で殻長方向が底面と水平になるように配置した場合の抗力係数 (C_D) のレイノルズ数 (Re : S_L を代表長) による変化、各 Re 数領域における C_D 値の迎え角による変化、及び迎え角 $\theta = 0$ における傾斜角 η による変化を示したものである。これより C_D 値は $\theta = 0, \pi$ においては 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 0.41 及び 0.38 程度に収束すること、殻長方向を底面と平行に配置した場合、 C_D 値は θ に対してほぼ無指向的に変化すること、及び C_D 値が傾斜角に大きく依存することなどがわかる。

d) 揚力特性

ホタテガイは表面が恒常的に底層流の影響下にあるため、安定条件を検討するためには揚力特性の解明が不可欠となる。図-6 は、揚力係数 (C_L) の傾斜角を 0 とした場合の Re 数による変化、迎え角 (θ) による変化、及び腹縁 ($\theta=0$) 方向における傾斜角 (η) による変化を示し

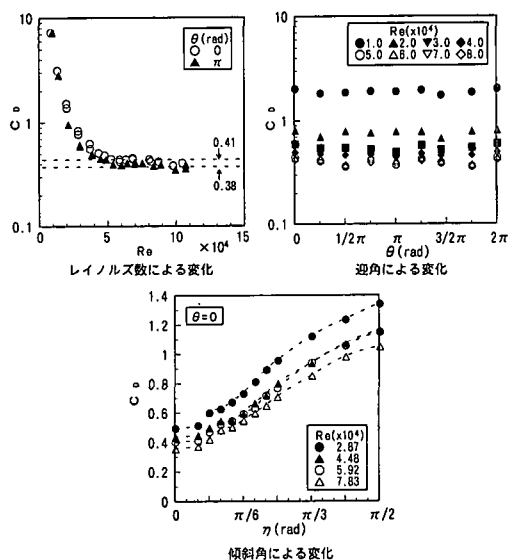


図-5 抗力係数の諸特性

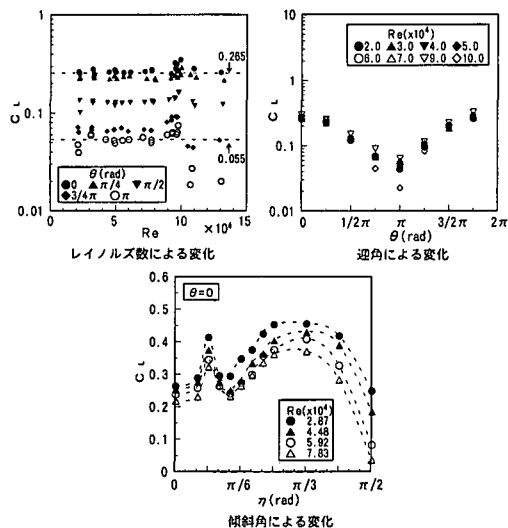


図-6 揚力係数の諸特性

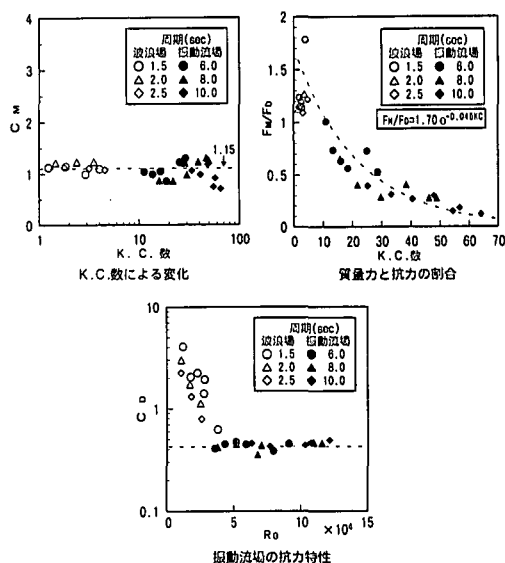


図-7 質量力係数の諸特性

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。更に、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、揚力係数は腹縁方向の約 1/6 に留まる。また、腹縁方向 ($\theta=0$) の傾斜角 $\eta=\pi/12$ 付近に極大値が存在することがわかる。

e) 質量力特性

図-7 は振動流場において、殻長方向を底面と水平に $\theta=0$ で配置されたホタテガイの質量力係数 (C_M) の K.C. 数による変化、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) による変化、更に、全作用流体力における抗力成分 (F_D) と質量力成分 (F_M) の割合の K.C. 数による変化を示したものである。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 1.15 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 0.4 程度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 (60 程度以上) ではオーダ的に無視することができる。

3. ホタテガイの移動条件

3.1 実験方法

前述のように、主流流速の上昇に伴う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ため、ホタテガイの転倒に対する安定条件について、以下に示すように背縁部を頂点とした力のモーメントの

釣り合い条件より検討した。

$$W_w \cdot L_G > \left(\frac{1}{2} C_{D\rho} A_x u^2 + C_{M\rho} V \frac{du}{dt} \right) \\ \times L_F \tan \eta + \frac{1}{2} C_{L\rho} A_z u^2 L_F \dots\dots\dots (5)$$

$$L_G = 0.43 S_L \dots\dots\dots (6)$$

$$L_F = 0.035 S_L Re^{0.33} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 u は主流流速、 L_G は背縁先端部より水中重心までの距離、 L_F 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 、 z は各水平及び鉛直方向の成分を意味している。

上式の妥当性を検討するために、鉛直循環式大型回流水槽を使用して、水路底部に珪砂を敷いた上で、ホルマリン固定したホタテガイが流れに対して復縁及び背縁を向くように配置し、定常流場及び振動流場（周期 6～10 秒）において主流流速（振幅）を 5 cm/s 刻みで上昇させて水槽上部及び側面に固定したビデオカメラでホタテガイが流れによって移動を開始する状況を観察した。

3.2 移動限界流速

一般に、波浪場においては、(5)式における揚力の項は抗力及び質量力の項と比較してオーダー的に 1 桁以上大きな値をとるため、揚力係数の傾斜角による特性がホタテガイの安定を決定する主要因と考えられる。揚力係数は図-6 に示すように $\eta = \pi/12$ 付近にピークを持つため、 $\eta = \pi/12$ における C_L 値をもとに (5) 式より計算される移動限界流速を初期移動限界流速 (u_{bi})、また、 $\eta = 0$ における C_L 値をもとに計算される流速値を全面移動限界流速 (u_{ba}) と定義した上で、 u について整理・簡単化すれば

$$u_{bi} = 10.36 S_L^{0.40} \dots\dots\dots (8)$$

$$u_{ba} = 15.25 S_L^{0.38} \dots\dots\dots (9)$$

で近似的に殻長の関数として表現できて、貝の殻長 (S_L)、及び当該域の波浪条件（平均波高 $\bar{H}$ 、平均波周期 $\bar{T}$ ）をもとに、各々の移動限界流速に対応する生息限界水深 (h : 生息可能水深の浅限) を図示すると図-8 となる。なお、質量力成分については、他の成分と比較して

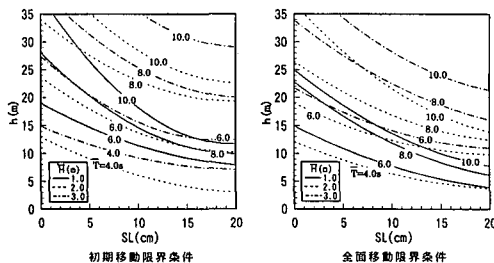


図-8 ホタテガイの移動限界条件

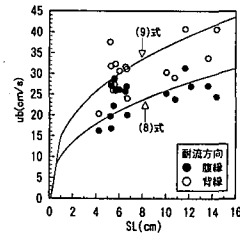


図-9 移動限界流速（実験結果）

オーダー的に無視できるため省略している。

図-9 は、水槽実験において主流流速の上昇に伴いホタテガイの転倒が生じた限界流速 (u_b) を、主流に対するホタテガイの配置方向が腹縁及び背縁方向の場合について殻長で整理した実験結果と、(8)、(9) 式より計算される移動限界流速値を比較したものである。これより、ホタテガイの移動限界は腹縁方向の安定条件より検討できることがわかる。また推定値は実験値とほぼ一致しており (8)、(9) 式の妥当性が検証された。

4. ホタテガイ漁場への適用

4.1 漁場の概要

本研究で明らかとなったホタテガイの移動条件を北海道鵠川沖に造成されたホタテガイの養殖漁場に適用した。

当該漁場では、図-10 に示すように距岸 5～13 km（水深 15～40 m）に 7 つの輪採区を設けて 1989 年より大規模な種苗放流を実施するとともに、放流貝の成長・移動・生残などの調査を継続している。本章では、1994 年 3～4 月に C 海区周辺の約 100 ha の海域へ 5.0～5.3 個体/m² の密度で放流されたホタテガイの移動分散について検討

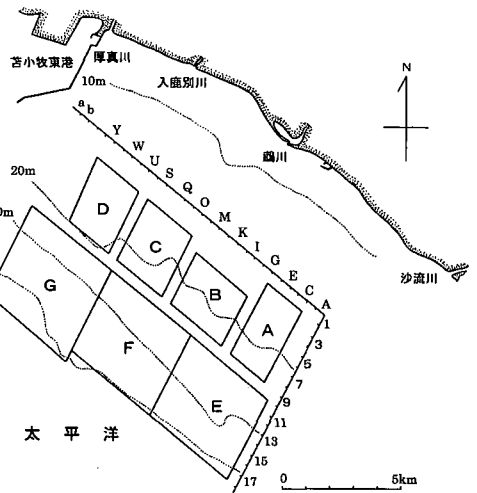


図-10 ホタテガイ漁場

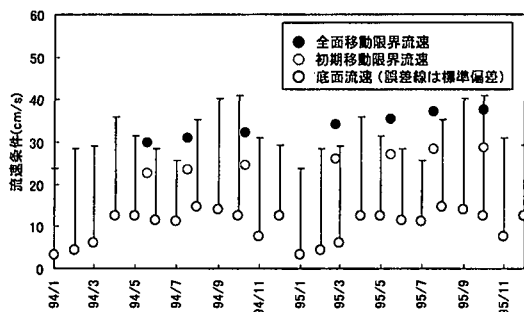


図-11 放流海区の底面流速と移動限界流速の関係

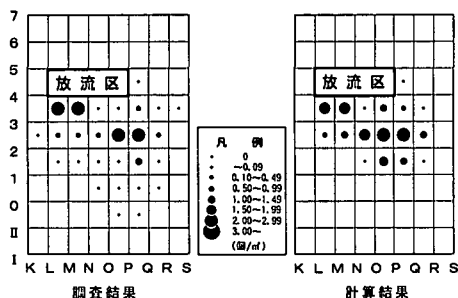


図-12 移動状況の計算結果と調査結果の比較

する。同海区周辺は図-10に示すように500 m間隔の格子状に調査区画が設定され、放流後、計3回に亘って、桁網(桁幅2.5 m)を用いて各区画の陸側を500 m曳網し、貝の分布密度を調査している。また、同海区周辺の波浪計算は苫小牧勇弘沖における既往波浪統計より、エネルギー平衡方程式をもとに漁場を中心とした22.5 km×33.5 kmの海域について実施し、波高、波向や、微小振幅波理論に基づく底面流速・質量輸送速度を算出した。

4.2 移動限界条件

C海区周辺に放流されたホタテガイは放流後の約1年半で平均殻長が53 mmから105.2 mmまで成長する。図-11は当該域の波浪統計資料をもとに、放流区における月別の平均波高・周期より底面流速を計算し、(8)、(9)式より求まるホタテガイ移動限界流速の月別変化と比較したものである。これより、波浪に伴う平均流速は8～9月頃ピークをとり、貝の移動限界流速値の6割程度に留まっている。しかしながら、ホタテガイの移動限界流速は底面流速値の月別標準偏差の最大値を下回りながら推移していることから、波浪特性の年変動に移動の有無が有意に依存することがわかる。

4.3 分散状況の検討

C海区の放流貝については、台風などに伴う長周期の

うねりの襲来による分散が指摘されている。資源量調査より放流貝は5月及び7月には、そのほとんどが放流区を中心(若干岸より)に分布していたが、9月18～19日にかけて襲来した台風24号通過後の10月の調査ではほぼ全てが放流区外の北側(陸側)へ直線距離で約2 kmの範囲内に移動・分散したことがわかっている(苫小牧・厚真・鶴川ホタテ漁場災害対策連絡協議会, 1995)。

図-12は、台風に伴う波浪観測結果より、底面流速が移動限界条件を上回る時点より台風通過後までのホタテガイの移動状況を計算し、調査結果と比較したものである。計算ではホタテガイの殻長を7 cmとして、波浪に伴う移動距離は、振動流下における水粒子の移動速度に対する貝の移動速度(山下ら, 1997)の比を、水粒子の質量輸送速度に乗じた上でラグランジュ的に追跡した。これより、計算結果は、高密度群の移動方向、移動距離において現地調査による移動分散状況と概ね一致していることがわかる。なお、分布密度については、若干大きめの値をとっているが、これは、計算では貝の殻長組成や、波浪に伴う砂礫の発生など海底地形の微変動、さらに海浜流などの流れの影響が考慮されていないことなどによるものと考えられる。

5. おわりに

ホタテガイ放流種苗の波浪に対する移動・分散特性を実験的に調べ、本種の放流条件について検討した。本研究で得られた主要な結論を以下に述べる。

① ホタテガイの射影面積、排除水質量、水中重量などの諸特性を殻長で評価した上で、抗力・揚力・質量力係数など本種の流体力特性を明らかにした。

② 波浪場におけるホタテガイの安定条件を、本種の転倒移動条件より検討し、初期移動限界流速、及び全面移動限界流速を明らかにした。

③ ホタテガイの安定条件をもとに、種苗放流後の高波浪による移動分散状況を数値計算し、移動方向及び主要個体群の移動距離をほぼ再現できた。

参考文献

- 苫小牧・厚真・鶴川ホタテ漁場災害対策連絡協議会 (1995): 苫小牧・厚真・鶴川ホタテ漁場診断調査報告書, pp. 1-47.
- 山下俊彦・星 秀樹・和田 彰・櫻井 泉・瀬戸雅文 (1997): 流動場でのホタテ貝の挙動に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 321-325.
- Miyake, H., Matsuoka, M. and Furuya K. (1995): Loss of and Damage to Scallops due to storms in the Sea of Okhotsk, Fish. Oceanogr., Vol. 4, pp. 293-302.