



Title	人工魚礁における有用魚介類の蛸集と増殖機能に関する研究
Author(s)	伊藤, 靖
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第11526号
Issue Date	2014-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11526
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57129
Type	doctoral thesis
File Information	Yasushi_Ito.pdf



人工魚礁における有用魚介類の蝟集と増殖機能に関する研究
(A Study of Artificial Reef Functions for Gathering and
Propagation of Fishes and Shellfishes)

伊藤 靖
Yasushi Ito

平成 26 年 (2014)

人工魚礁における有用魚介類の蝸集と増殖機能に関する研究

(A Study of Artificial Reef Functions for Gathering and Propagation of
Fishes and Shellfishes)

北海道大学大学院水産科学院
海洋生物資源科学専攻

Graduate School of Fisheries Sciences
Division of Marine Bioresource and
Environmental Science

伊藤 靖
Yasushi Ito

平成 26 年 (2014)

人工魚礁における有用魚介類の蛸集と増殖機能に関する研究

目 次

序 章	1
第1章 マコガレイ稚魚の蛸集機能と餌料供給による増殖機能	3
1. はじめに	3
2. 方法	4
2.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境	4
2.2 調査対象とした人工魚礁および周辺における動物群の分布状況	8
2.2.1 海藻類と葉上動物	8
2.2.2 付着動物	8
2.2.3 底生動物	9
2.3 マコガレイ稚魚の蛸集状況	9
2.4 餌生物と食物網	10
3. 結果	16
3.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境	16
3.2 調査対象とした人工魚礁および周辺における動物群の分布状況	16
3.2.1 海藻類と葉上動物	16
3.2.2 付着動物	22
3.2.3 底生動物	26
3.3 マコガレイ稚魚の蛸集状況	33
3.4 餌生物と食物網	36
4. 考察	49
第2章 マアジの蛸集・滞留機能と産卵場としての増殖機能	53
1. はじめに	53
2. 方法	54
2.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境	54
2.2 マアジの蛸集状況	54
2.2.1 全長組成	54
2.2.2 蛸集量の推定	54
2.2.3 個体の行動様式	55
2.3 増殖機能	65

2.3.1 餌生物と食物網	65
2.3.2 成熟状況	66
3. 結果	68
3.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境	68
3.2 マアジの蠣集状況	68
3.2.1 全長組成	68
3.2.2 蠣集量の推定	73
3.2.3 個体の行動様式	73
3.3 増殖機能	86
3.3.1 餌生物と食物網	86
3.3.2 成熟状況	86
4. 考察	93
第3章 ズワイガニの蠣集による漁獲からの保護効果と産卵場としての増殖機能	
1. はじめに	99
2. 方法	100
2.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境	100
2.2 保護効果と魚介類の蠣集状況	100
2.3 餌生物と食物網	111
3. 結果	114
3.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境	114
3.2 保護効果と魚介類の蠣集状況	118
3.3 餌生物と食物網	127
4. 考察	130
第4章 総合考察	136
謝辞	143
参考文献	144

序 章

近年、日本をはじめ多くの国々の沿岸で、埋め立てによる自然海岸や藻場、干潟の消失および赤潮、富栄養化、貧栄養化など様々な問題が顕著化している。このような中で、豊かな海の環境と生態系を維持しながら自然の摂理のもとで水産資源の変化を理解し、資源を持続的に利用する漁業のあり方が、問われている。

世界の海洋関連の国際機関における最大の関心事は、地球規模での環境問題と食料問題に対する海洋の生物生産の持続性、多様な生物の生息場所の確保と保全、社会・経済的あるいは社会・生態的な価値評価による総合的診断、そして海洋の生物多様性の保全にある(桜井, 2010)。

これらを実現する一つの方法として、欧米各国では、国主導の厳しい資源・漁業管理がなされ、対象資源が激減した場合には一部で全面禁漁や海洋保護区(Marine Protected Area ; 以下, MPA) などの措置が図られている(桜井, 2010)。MPA は、海の健全性を保障する海洋生態系の生物多様性保全を考慮した持続的漁業を目指す漁業管理への生態系アプローチの一つの手段として位置づけられ、世界各国でその取り組みが始まっている(Murawski *et al.* 2010, FAO 2005, 2006)。

一方、わが国ではこれらの問題に対処する方法として、資源管理、栽培漁業、および人工魚礁を用いた漁場造成等の施策が全国各地で行われてきている。その中でも、人工魚礁による漁場造成は、対象とする水産生物の漁獲の増大、漁獲の効率化、および保護・育成を図ることにより、持続的漁業を推進する重要な取り組みとして世界的に注目されている。

初期の人工魚礁による漁場造成は、天然礁に魚介類が集まるという経験則から始まった。また、人工魚礁の祖型は、各地で行われてきた柴漬漁法、石塚、石釜、および石材や木材を水中に沈めて魚を集め、漁獲する漬漁法である。それが、投石(築磯)や沈船などに繋がり、やがて、コンクリート製や鋼製の人工魚礁となり(小川, 1968)、その主な機能は対象生物を蛸集させて漁獲する副漁具的役割であった。その後、副漁具的な役割に加えて、生態系保全の重要性の意識が高まる中、水産資源の減少、浅海域の藻場の減少、および漁場環境の悪化などの修復技術としても用いられるようになった。具体的には、稚魚などの生息場である浅海域では失われた藻場や干潟の造成や修復、単なる漁獲漁場から資源増大を目指した魚介類の増殖場の造成、さらに保護・育成礁へと利用目的が拡大されるとともに、生物多様性の確保を目的とした水中構造物として位置づけられている。とりわけ、浅海域に設置された人工魚礁は、海域の基礎生産者のひとつである海藻類にとっては着生基盤の造成となり、物質循環を通じて海域の生産力の増大に貢献する。また、人工魚礁に付着あるいは周辺の底

質中などに生息する動物にとっては生息基盤の造成であり、高められた基礎生産を利用して現存量を増大させ、魚介類にとっても良好な餌場となる。

さらに、浅海域から深海域に設置された人工魚礁とかかわり合いをもつとされる魚介類は、表中層遊泳魚類、岩礁性魚類、および底魚類を含めて、本邦では120種以上に及ぶことが報告されている（小川，1968）。これら、人工魚礁とかかわり合いをもつ多様な魚介類は、流動、水温、塩分、水中光量、および底質などの物理・化学環境、餌生物・競合生物・捕食者の有無、そして生殖などの自らの生活史によって行動様式を変化させる。従って、人工魚礁による漁場造成は、魚介類が要求する適正な生息環境や生理的な欲求を満足させる構造を人為的に創出する技術である。

しかしながら、人工魚礁と魚介類との関わり合いに関するこれまでの研究は、個別的な魚介類の分布様式やその時点での環境条件から論議されており、人工魚礁とその周辺を一つの生態系として体系的に捉えた研究は、海中における調査技術の制限もあり、ほとんど行われてこなかった（柿元，1967；津村ら，1992）。従って、これら生物と人工魚礁の関係を、人工魚礁がもつ多様な機能の面から明らかにすることは意義深い。

人工魚礁による漁場造成は、自然からの恵みである漁獲物を生態系から享受できるサービスの一部として体系的に捉えることが必要である。そして、その恵みが生み出される過程を理解することにより、その仕組みを持続的に利用するための様々な方策や管理体制が明らかになってくると考えられる。そのためにはハード技術に加え、乱獲や混獲の防止などのために必要な法的な規制や指導などのソフト技術を合わせて実施して、資源増大と保護を達成することが必要である。

本研究では、従来から行われてきた潜水目視や漁獲による採捕調査に加え、近年小型化が進み多機能センサーが搭載された超音波バイオテレメトリーや、操作性能が向上した自航式水中ビデオカメラ（Remotely operated vehicle）、あるいは炭素と窒素の安定同位体比分析などの各種調査技術を併用して、極浅海域に設置された人工魚礁においては底魚類であるマコガレイ *Pseudopleuronectes yokohamae*、水深45m付近に設置された高層型の人工魚礁では、多獲性浮魚類のマアジ *Trachurus japonicus*、さらに水深300m付近の深海域に設置された人工魚礁においては底生の大型ベントスであるズワイガニ *Chionoecetes opilio*を対象に、これらの調査手法の有効性を検証し、生態系保全の視点から人工魚礁の蝸集と増殖機能を明らかにする。また、この検証作業を通じて、人工魚礁の調査手法や効果判定手法を提案する。さらに、人工魚礁の効果をより長期にわたり持続させるための造成漁場の利用管理について提案する。

第1章 マコガレイ稚魚の蛸集機能と餌料供給による増殖機能

1. はじめに

マコガレイ *Pseudopleuronectes yokohamae* は、北海道南部から九州沿岸、朝鮮南部、および東シナ海北部の水深 100m より浅い、砂泥底に分布する底魚類であり、底曳網、刺し網、および釣り等によって漁獲されている(落合ら, 1998)。本種の漁獲量は激減しており、その回復を目的として、2005 年には青森県から大分県まで 7 県で 320 万尾(平均全長 23mm)の種苗が生産され、10 県 41 機関で放流されている(全国豊かな海づくり協会, 2008)。また、2006 年には宮城県や愛媛県など、5 海域 8 県が本種を対象とした資源回復計画に取り組んでいる。

本種の産卵期は陸奥湾から太平洋を通して瀬戸内海では、概ね 12 月から 1 月の範囲にあり(石野ら, 1995)、沈性粘着卵を産む(岩井, 1985)。仔魚の浮遊期間は約 30 日間で、全長 8mm 前後で沿岸域に着底する(福永, 1976; 南, 1981; 睦谷, 1988)。その後、成長に伴って生息域を沖合域に広げる(香川県ら, 1975)。兵庫県の瀬戸内海では着底後しばらくの間は沿岸部の砂泥域で生活し、全長 60~70mm 前後になると転石藻場(増殖場)に生活の場を移し、さらに、その沖合へ分布域を広げて行くとされている(反田, 2008)。しかし、人工魚礁との位置関係から明確にその蛸集機能を評価した研究はみあたらない。

また、マコガレイ稚魚の食性は、全長 19mm 以下では専ら底生かいあし類を摂餌し、全長 20~39mm になるとクーマ目や端脚目ヨコエビ亜目に変化し、さらに全長 40~79mm になると多毛綱へと変化する(香川県, 1975; 南, 1981, 東海ら, 1989; 中神ら, 2000; 有山, 2003; 反田, 2008)。しかし、人工魚礁と餌生物のかかわり合いに関する研究はみあたらない。

そこで本研究では、瀬戸内海の岡山県備前市日生町沿岸に設置されている人工魚礁を対象に、人工魚礁周辺での底質などの変化、人工魚礁に着生する海藻類と葉上動物、付着動物、および底生動物の分布状況と、マコガレイ稚魚の人工魚礁周辺における分布状況を調べ、蛸集機能を検討した。さらに、人工魚礁に蛸集するマコガレイ稚魚の消化管内容物、マコガレイ稚魚と人工魚礁のごく周辺に出現した動物群との捕食-被捕食関係から、餌料供給による増殖機能を検討した。

2. 方法

2.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境

本研究で対象とした人工魚礁（以下、魚礁区）は、2000年3月に岡山県備前市日生町沿岸の最低水面（Datum Level：以下、D.L.）-4.1~-4.3m（34° 42.7' N, 134° 18.2' E）の海底に、設置されたものである（図-1.2.1）。魚礁区には、魚礁単体30基が6m程度の間隔で配置されている（図-1.2.2）。魚礁単体の形状は、礁高2.2m、幅3.4mである。さらに魚礁単体には、付着動物の増殖を促進するために、貝殻を利用した増殖基質（以下、餌料培養基質）が上部、側部、および内部に備えられている（図-1.2.3, 海洋建設社製）。餌料培養基質の構造は、直径15cm、長さ1mの高密度ポリエチレン樹脂のメッシュパイプ（2.0×2.5cm）に殻長約10cm、殻高約5cmのマガキ殻が最大個数充填されている。マガキ殻の重ね合わせによって、狭く複雑な空間が形成されている（図-1.2.4）。

魚礁区において2004年9月から2006年9月の間の調査回毎に、水温、塩分、および透明度を測定した。表層水温については海面から表層水をバケツで掬い取り、底層水温については、バンドーン採水器（吉野計測社製）により海底面から50cmまでの底層水を採水し、棒状水銀温度計を用いて測定した。塩分については、水温測定と同様に、表層水および底層水を採水し、塩分計（電気伝導率計CM-21P, 東亜ディーケーケー社製）を用いて電気伝導度を測定し、海洋観測指針（1981）に従って算出した。透明度については、透明度板（AMT-30, HOGA社製）を用いて測定した。

底質については、粒度組成と強熱減量を分析した。粒度組成の検体は、2005年4月に、魚礁区0m, 10m, 20mおよび対照区で採泥した。分析法は、ふるい分け法・沈殿法（JIS A1204）によった（図-1.2.5）。強熱減量の検体は、2006年2月および9月に、魚礁区の0m, 5m, および10mで採泥し、試料を600℃前後で加熱して乾燥させ、有機物量を測定した（環水管 第127号）。採泥には、ステンレス製の採泥器（幅20cm×高さ20cm×長さ30cm）（図-1.2.6）を用い、表層から3cmまでの底質（500cm³程度）を、各調査点で3回ずつ採取、現地で混合し、冷蔵保存したものを分析試料とした。

本研究における人工魚礁関連の用語の定義は以下の通り。

人工魚礁：水産生物の増集や着生を目的として、石、コンクリート、鋼材、およびFRPなどを組み合わせて人工的に造成した漁場。

魚礁単体：人工魚礁を構成する1個の構造物。

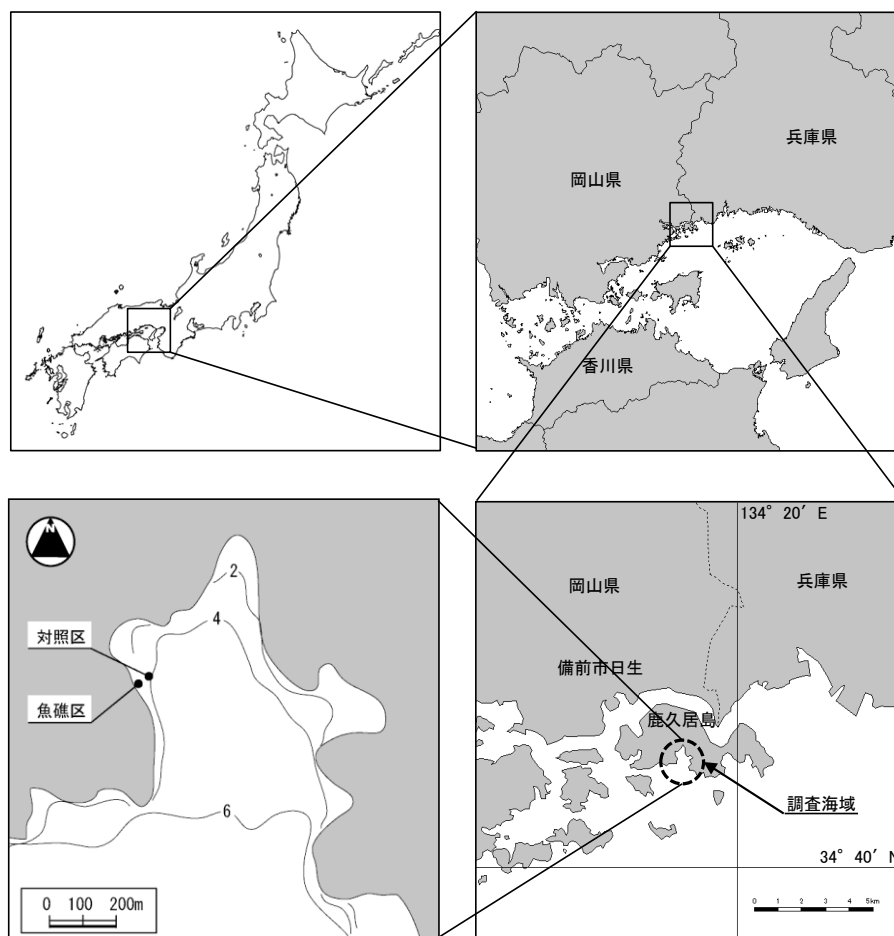


図-1.2.1 調査海域(岡山県備前市日生町沿岸域)

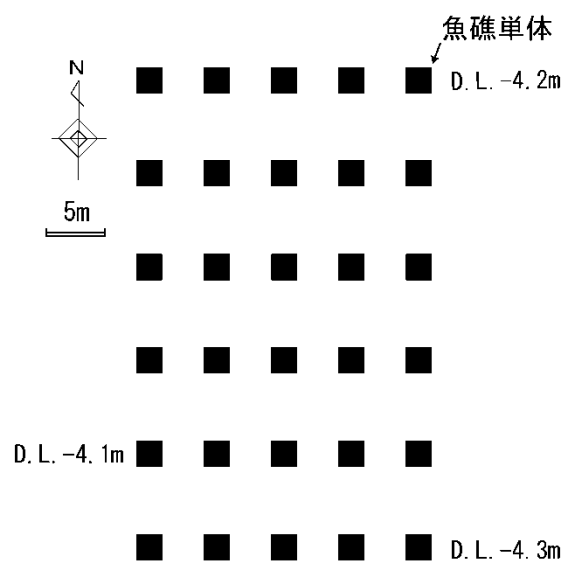


図-1.2.2 魚礁区の魚礁単体の配置

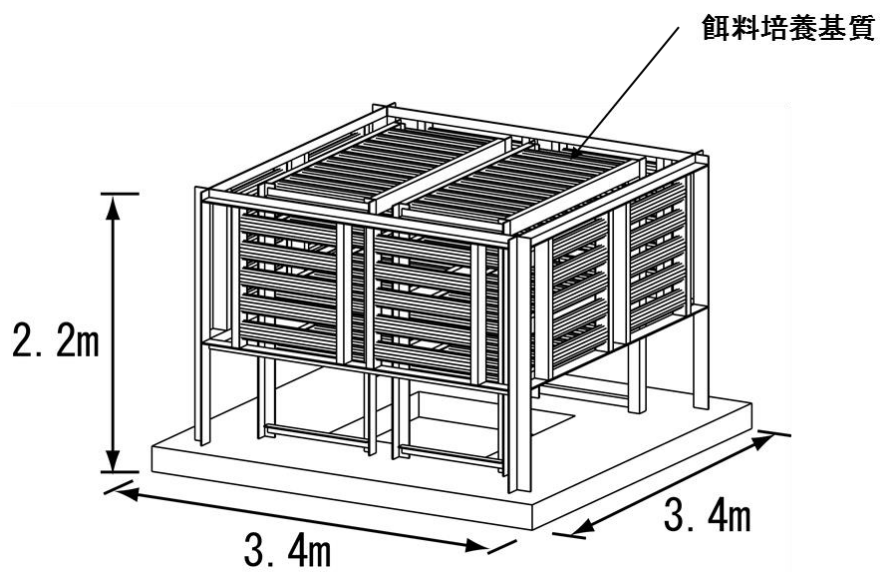


図-1.2.3 魚礁単体の形状（海洋建設社製）

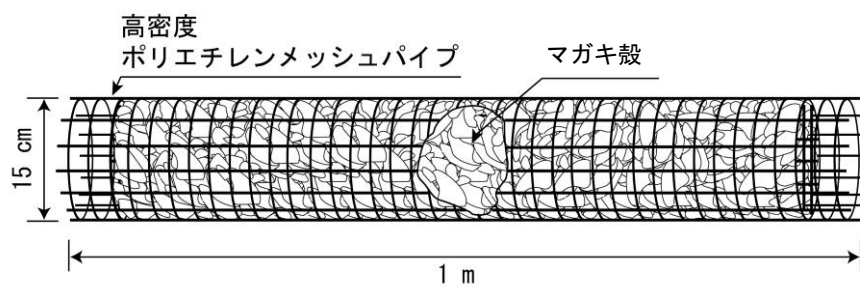


図-1.2.4 魚礁単体に使用されている餌料培養基質の構造

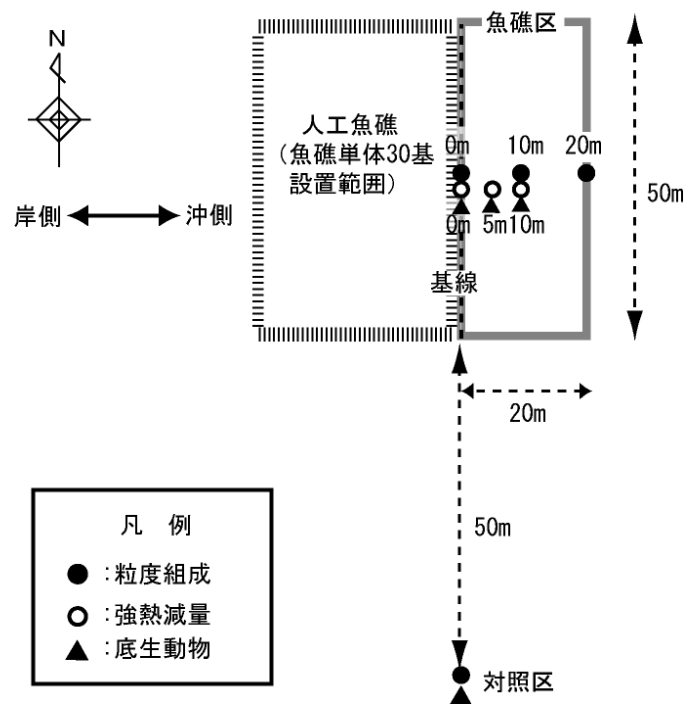


図-1.2.5 底質および底生動物の調査点



図-1.2.6 採泥器

2.2 調査対象とした人工魚礁および周辺における動物群の分布状況

2.2.1 海藻類と葉上動物

海藻類および葉上動物の分布状況の把握は 2004 年 12 月，2005 年 3 月，4 月および 7 月の計 4 回行った。海藻類は，スキューバ潜水により魚礁区内から各調査時に任意に選んだ魚礁単体から，海藻類を全量採取した。海藻類は，分類群別に湿重量および乾燥重量を測定し，魚礁単体当たりの乾燥重量を求めた。乾燥重量は，送風定温乾燥器により 90℃程度で恒量になるまで乾燥させ，測定した。

葉上動物は，魚礁単体に着生した海藻類 3～5 株程度を根元から刈り取り，水中で木綿袋に収容して陸上に持ち帰った。採取された海藻類は海水を満たしたバケツに移して，付着している葉上動物を洗い落とし，これを 1mm メッシュのふるいにかけ，ふるい上に残った葉上動物を分析試料とした。分析試料は 10%ホルマリン溶液で固定後，分類群別に同定し，個体数および湿重量を計数，測定した。また，(1)式により魚礁単体当たりの葉上動物の湿重量を算出した。

$$A_r = w_r / w_s \times \sum a_s \dots\dots\dots (1)$$

A_r : 魚礁単体当たりの葉上動物の湿重量 (g/基)

a_s : 刈り取った海藻類に付着している葉上動物の分類群別湿重量 (g)

w_r : 魚礁単体当たりの海藻類の乾燥重量 (g/基)

w_s : 刈り取った海藻類の乾燥重量 (g)

2.2.2 付着動物

魚礁単体には，増殖基質として貝殻を利用した餌料培養基質が付加されている。餌料培養基質を直接回収し分析試料と出来ないことから，同一材料で新たに製作した直径 15 cm，長さ 30 cmの貝殻テストピース（以下，貝殻基質）を，2004 年 3 月に魚礁単体の上面に設置した。また，付着動物量を基質による違いから比較検討するため，貝殻基質と同サイズ・同形で，内部空隙や表面に凹凸がないコンクリート製テストピース（以下，コンクリート基質）を，貝殻基質と同様に設置した。

調査は，設置 12 ヶ月後の 2005 年 3 月，7 月，12 月，2006 年 2 月，および 9 月の計 5 回行った。両基質の回収方法は，スキューバ潜水によって，付着動物が逸脱しないよう素早く両基質を魚礁単体から取り外して木綿袋に収容し，陸上に持ち帰った。回収した両基質から，付着動物を全て剥ぎ取って 1mm メッシ

ユのふるいにかけて、ふるい上に残った付着動物を分析試料とした。分析試料は10%ホルマリン溶液で固定後、分類群別に同定し、個体数および湿重量を計数、測定した。

2.2.3 底生動物

底生動物調査は図-1.2.5 に示す調査地点において、2005 年 4 月、7 月、12 月、および 2006 年 9 月の計 4 回行った（図-1.2.5）。調査地点は、魚礁区に基線を設け基線中央部を基点とし、基点から沖方向に 0m、5m、および 10mとした。さらに、魚礁区から南方向へ約 50m離れた魚礁区と同一水深を対照区とした。

調査はスキューバ潜水により、ステンレス製の採泥器（図-1.2.6）を 50 cm 曳いて、表層から 3cm までの底質（3,000 cm³）を、各調査点で 3 回ずつ採取した。採取された底質は、1mm メッシュのふるいにかけて、ふるい上に残った底生動物を分析試料とした。分析試料は 10%ホルマリン溶液で固定後、分類群別に同定し、個体数および湿重量を計数、測定した。得られた結果から、底生動物の多様度指数 H' を(2)式（シャノン・ウィーバーの H' ）により求めた。

$$H' = -\sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$p_i = n_i / N$$

p_i : i 番目の種類の個体数 n_i の全個体数 N に占める割合

S : 試料中の出現種類数

本章では、今島（1996, 2001）および稲葉（1988）から、底生動物を生活様式により区分した（表-1.2.1）。主に底質中に生息する種を A 群、主に基質に固着・潜入する種を B 群、および A 群と B 群の両環境中に生息する種を C 群と、定めた。

2.3 マコガレイ稚魚の蛸集状況

マコガレイ稚魚の蛸集状況を 2005 年 4 月 13 日、2006 年 2 月 23 日、3 月 9 日、4 月 17 日、および 27 日の 5 回、昼間のスキューバ潜水により調査した。調査範囲は、魚礁区と対照区を設定し、魚礁区では魚礁単体の設置範囲の東端に南北方向に基線を設け、その東側の 20×50mとした（図-1.2.7）。調査点は基線中央部を基点とし、基点 0～10mまでの間の 2m毎の 6 点と 20mの計 7 点とした。また、対照区は魚礁区から南側へ 20m離れた場所とし、魚礁区と同様の調査点を設けた。

計数方法は、潜水土が両区の各調査点の海底に 0.5×0.5mのコドラートを任意に設置し、直後に、コドラート内に分布するマコガレイ稚魚の個体数を目視

で計数した。計数回数は、2005 年では、基点から 0m, 10m, および 20m の 3 調査点で 5 回, 2~8m の 4 調査点では 3 回とした。2006 年では、事前の目視観察においてマコガレイ稚魚の分布密度が低かったことから、各調査点とも 9 回計数した。さらに、目視観察時に、たも網（網口幅 12cm, 網口高 15cm, 3mm 目）を用いて、魚礁区と対照区のマコガレイ稚魚を採捕した。採捕されたマコガレイ稚魚の全長（mm）と体重（湿重量；g）を計測した。

2.4 餌生物と食物網

マコガレイ稚魚（魚礁区 31 個体, 全長範囲 13.3~36.9mm；対照区 26 個体, 全長範囲 12.5~36.5mm）を、2009 年 4 月 7 日, 2012 年 3 月 8 日および同年 4 月 16 日にスキューバ潜水により、たも網（網口幅 12cm, 網口高 15cm, 3mm 目）を用い採捕した。調査範囲は魚礁区（魚礁単体の基線から 50cm 以内）と対照区（魚礁区から南側に 20m 離れた場所）とした（図-1.2.7；表-1.2.2）。採捕されたマコガレイ稚魚は、全長（mm）を測定し、消化管（胃および腸全体）を摘出した後、内容物は直ちに 10%ホルマリンで固定した。マコガレイ稚魚は氷冷状態で研究室に持ち帰り、筋肉部分を分取し、冷凍保存（-20℃, 以下の試料も同様）した。消化管内容物は、分類群別に同定し、それらの個体数および湿重量を計数、測定した。

マコガレイ稚魚の餌生物に関連する生物群としては、2009 年 4 月 7 日に植物プランクトンの指標となる水中の懸濁態有機物（Particulate Organic Matter；以下, POM）、動物プランクトン、底生動物（以上、魚礁区、対照区共通）および魚礁区のみで、人工魚礁の天端部に繁茂するアカモク *Sargassum horneri* と葉上動物、人工魚礁壁面の付着動物を採取した（表-1.2.2）。また、2012 年 4 月 22 日に魚礁区、対照区において、底泥表層の有機堆積物（Sediment Organic Matter；以下, SOM）、底生微細藻類（Microphytobenthos；以下, MPB）、かいあい類ハルパクチクス目 Harpacticoida を採取して、冷凍保存した。

これらの採取法は以下の通りとした。POMは、船上からバケツにより採水して、冷暗状態で分析室に搬入、直ちにプランクトンネット地（250 μ mメッシュ）で濾過して、動物プランクトンなどを除去した後、あらかじめ450℃で3時間加熱処理をしたグラスファイバー濾紙（GF/Fフィルター, Whatman社製；以下, グラスファイバー濾紙）で減圧濾過を行い、冷凍保存した。

SOMとMPBは、スキューバ潜水により、底泥の表層2cm程度を1Lの広口ポリビン2本分を採取し、氷冷状態で研究室に持ち帰った後、1検体はSOM分析用としグラスファイバー濾紙に適量を分取した。その他の1検体は、MPBの走光性を利用したビーズ法（Carol, 1989；Yokoyama and Ishii, 2003）によりMPBと底質を分離した。分離したMPBはグラスファイバー濾紙で減圧濾過を行い冷凍保存した。

ハルパクチクス目は、スキューバ潜水により、底泥の表層2cm程度を直上水とともに2Lの広口ポリビンで採取し、氷冷状態で研究室に持ち帰った後、採取された底泥をビーカーに小分けして、かきまぜ法(山西, 1979)により底泥を分離し、分離した上澄み液からハルパクチクス目を実体顕微鏡で70個体程度抽出し、濾過海水で数回洗浄してグラスファイバー濾紙上に移し、冷凍保存した。動物プランクトンは、北原式定量プランクトンネット(0.10mmメッシュ)により、水深2m層を水平曳きにより採取し、氷冷状態で研究室に持ち帰った後、濾過海水で数回洗浄して夾雑物を目視で除去してからグラスファイバー濾紙上に移し、冷凍保存した。

底生動物は、スキューバ潜水により、底泥を25×25×10cm程度を採取し、船上で1mmメッシュのふるいでふるい分けして残った生物を氷冷状態で研究室に持ち帰り、マコガレイ稚魚の餌と推定された多毛綱(ミズヒキゴカイ *Cirriformia tentaculata*; 5個体)、ヨコエビ亜目(ニホンドロソコエビ *Grandidierella japonica*; 20個体)を抽出し、濾過海水で数回洗浄した後に筋肉部分を摘出し、冷凍保存した。

魚礁区の葉上動物とアカモクは、スキューバ潜水により、人工魚礁に繁茂するアカモクにサーバーネット(0.5mmメッシュ)を被せて、同時に採取した。葉上動物は、採取したサーバーネット中のアカモクを船上で海水により洗浄し、洗い落とした生物をさらに1mmメッシュのふるいでふるい分けして残った生物を氷冷状態で研究室に持ち帰り、ヨコエビ亜目(ホソヨコエビ *Eriethonius pugnax*; 10個体)を抽出し、濾過海水で数回洗浄した後に筋肉部分を摘出し、冷凍保存した。アカモクは、氷冷状態で研究室に持ち帰り、葉部の表面の付着物をブラシでこすり落として濾過海水で数回洗浄した後に、冷凍保存した。

魚礁区の付着動物は、サーバーネット(0.5mmメッシュ)付のコドラート(25×25cm)を人工魚礁の壁面に当て、スクレーパーにより表面の付着物を剥ぎ取り、船上で1mmメッシュのふるいでふるい分けして残った生物を氷冷状態で研究室に持ち帰り、ヨコエビ亜目(トゲヨコエビ属 *Liljeborgia* sp.; 20個体)を抽出し、濾過海水で数回洗浄した後に筋肉部分を摘出し、冷凍保存した。

なお、SOMとPOMは、試料中の無機炭素塩を除去するため濾過の終了直前に1Nの塩酸を約1mL滴下した。また、マコガレイ稚魚、多毛綱およびヨコエビ亜目は、脱脂処理のためクロロフォルム-メタノール(2:1)溶液を加えて20分間の遠心分離を2回繰り返した後にグラスファイバー濾紙に移し、冷凍保存した。

安定同位体比の分析 各試料は分析前に順次解凍し、POM, SOM, MPBおよび動物プランクトンは乾燥重量で約1mg、ハルパクチクス目は抽出した70個体から乾燥重量で約1mgを分取し、マコガレイ稚魚、多毛綱(底生動物)、ヨコエビ亜目

(底生動物, 葉上動物および付着動物) は筋肉部を乾燥重量で約1mg, アカモクは約5mgをそれぞれ粉末にして, 錫コンテナーに入れた。炭素・窒素安定同位体比は, 元素分析計 (EA1100, Fisons社製) に質量分析計 (DELTA plus ;Thermo Fisher Scientific 社製) を組み合わせたシステムによって求めた。

炭素・窒素安定同位体比は, 捕食動物とその餌生物との関係を示唆する。海域では栄養段階が1つ上がると, 窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) は約3.4‰, 炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は約1‰上昇する (DeNiro and Epstein, 1978, 1981)。これらに基づいて, 食物網を解析した。

データ整理と解析 本研究ではマコガレイ稚魚の空胃個体は, 分析, 解析に用いなかった。また, マコガレイ稚魚は, 得られた全長組成の分布を正規化することによりグループ分けして, 区分されたグループごと (A 地点のⅠ～Ⅱ, B 地点のⅢ～Ⅴ) に消化管内容物の検出結果, 炭素と窒素の安定同位体比の分析結果を集約した。

マコガレイ稚魚やそれぞれの生物群が示す安定同位体比の差は, 2 群間の場合マン・ホイットニー-U検定, 3 群間以上の場合クリスカル・ウォリス検定によって比較した。なお, SOM, MPB, ハルパクチクス目およびアカモクは分析試料がそれぞれ 1 検体であったため, 統計検定を行うことができなかった。

マコガレイ稚魚の餌 (底生動物の多毛綱・ヨコエビ亜目, 葉上動物のヨコエビ亜目, 付着動物のヨコエビ亜目) としての寄与率 (Contribution Ratio ; CR) を式(3)で求めた (Yokoyama H・Ishii Y, 2007 ; 笠井, 2008)。また, 本研究ではこの手法を拡張して, マコガレイ稚魚の炭素源を推定した。

$$CR (\%) = 100 \times (S \times C_c - S \times E_{2c} - C_N + E_{2N}) / (S \times E_{1c} - S \times E_{2c} - E_{1N} + E_{2N}) \cdots (3)$$

ここで, C_c と C_N は対象動物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$, E_{1c} と E_{1N} はターゲットとする基礎生産者あるいは餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$, E_{2c} と E_{2N} は対立する基礎生産者あるいは餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ である。 S は ^{13}C と ^{15}N の濃縮係数の比とした。

表-1.2.1 底生動物を生活様式で区分した分類群名

A群:主に底質中または表面に生息する種							B群:主に基質に固着・潜入する種						
No	門	綱	目	科	学名	和名	No	門	綱	目	科	学名	和名
1	紐形動物	無針	古紐虫	-	<i>Palaeonemertini</i>	古紐虫目	1	海綿動物	普通海綿	磯海綿	イソカイメン	<i>Halichondria sp.</i>	イソカイメン属
2	軟体動物	腹足	原始腹足	ミスコマツボ	<i>Stenothyra edogawaensis</i>	ウミコマツボ	2	海綿動物	単管海綿	ガウソウカイメン	<i>Alcionella sp.</i>		
3			中腹足	リソソボ	<i>Rissoidae</i>	リソソボ科	3	軟体動物	腹足	中腹足	ナメナツボ	<i>Alvania concinna</i>	タマツボ
4				バナコハナ	<i>Balcis sp.</i>	グムシガイ属	4			新腹足	アキガイ	<i>Bedeua birleifii</i>	カゴメガイ
5				タマガイ	<i>Notocochlis adamsiana</i>	アダムス・タマガイ	5		斧足	貧歯	イガイ	<i>Musculus cupreus</i>	タマガイ
6					<i>Naticinae</i>	タマガイ亜科	6					<i>Lithophaga curta</i>	イシマツガイ
7			新腹足	タマキガイ	<i>Turridae</i>	タマキガイ科	7				イホメカキ	<i>Ostrea circumpecta</i>	カクコロモカキ
8				オリエントヨフガイ	<i>Reticunassa fratercula</i>	クロシムシロ	8			無面	キヌマトガイ	<i>Hiatella flaccida</i>	キヌマトガイ
9					<i>Zeuxis caelatus</i>	ハナムシロガイ	9	環形動物	多毛	遊泳	オヒメコガイ	<i>Ophiidromus sp.</i>	
10					<i>Zeuxis succinctus</i>	ヒロオビヨフガイ	10				コガイ	<i>Neanthes sp.</i>	
11			腸紐	トウガタガイ	<i>Symnola tenuisculpta</i>	スナメナツキ属	11			定在	フサコガイ	<i>Nicolea sp.</i>	
12					<i>Turbonilla sp.</i>	イカガキ属	12	節足動物	ウミグモ	真皆脚	ユムシ	<i>Nymphon sp.</i>	
13					<i>Ringicula doliaris</i>	マウラシマ	13		甲殻	完脚	フツボ	<i>Balanus trigonus</i>	サンカワフツボ
14			側腔	タマコガイ	<i>Cylichnatys angusta</i>	カメシナカイコガイマシ	14			等脚	ウミナナフシ	<i>Paranthura sp.</i>	
15				スイカガイ	<i>Acteocina sp.</i>	コマツガイ属	15			端脚	アコナコガイ	<i>Pontogeneia sp.</i>	アコナコガイ属
16				キセツガイ	<i>Philine argentata</i>	キセツガイ	16				ワレバ	<i>Caprella gigantochir</i>	テナカワレバ
17					<i>Yokoyamaia ornatissima</i>	ヨコヤマキセツ	17			十脚	モレバ	<i>Heptacarpus sp.</i>	ワレバ属
18				カノキセツ	<i>Aglajidae</i>	カノキセツガイ科	18	腕足動物	無間接	新穴	盤殻	<i>Disciniscia sp.</i>	シロウスギ
19				異歯	<i>Gastropoda(eggs)</i>	腹足綱の卵塊	19	原索動物	海鞘	腸性	シテムニ	<i>Didemnum moseleyi</i>	カタユレイボ
20				ツキガイ	<i>Alvenius ojanus</i>	ケントリガイ	20				キオナ	<i>Ciona savignyi</i>	カタユレイボ
21				バナンガイ	<i>Phyllucina pisidium</i>	ウミバナンガイ	21			壁性	スチエラ	<i>Cnemidocarpa macrogastra</i>	マクリボヤ
22				サルガイ	<i>Fulvia hungerfordi</i>	トリガイ	22					<i>Styela clava</i>	エボヤ
C群:A群とB群の環境中に生息する種													
1	刺胞動物	花虫	イソキンチャク	-	<i>Actinaria</i>	イソキンチャク目	1	刺胞動物	花虫	イソキンチャク	-	<i>Actinaria</i>	イソキンチャク目
2	扁形動物	渦虫	多岐渦	-	<i>Polycladida</i>	多岐渦目	2	扁形動物	渦虫	多岐渦	-	<i>Polycladida</i>	多岐渦目
3	紐形動物	無針	原始紐虫	ケワフロリックス	<i>Procepalothrix sp.</i>	ワフロリックス属	3	紐形動物	無針	原始紐虫	ケワフロリックス	<i>Procepalothrix sp.</i>	ワフロリックス属
4				異紐虫	リネウス	リネウス科	4			異紐虫	リネウス	<i>Lineidae</i>	リネウス科
5		有針	針紐虫	-	<i>Hoploneurtema</i>	針紐虫目	5		有針	針紐虫	-	<i>Hoploneurtema</i>	針紐虫目
6	軟体動物	腹足	腸紐	トウガタガイ	<i>Odostomia sp.</i>	トウガタガイ	6	軟体動物	腹足	腸紐	トウガタガイ	<i>Odostomia sp.</i>	トウガタガイ
7				イガイ	<i>Musculus senhousia</i>	ホトキス	7			イガイ	<i>Musculus senhousia</i>	ホトキス	
8			異歯	マルスダレガイ	<i>Protothaca jodoensis</i>	オオサザリ	8			異歯	マルスダレガイ	<i>Protothaca jodoensis</i>	オオサザリ
9	環形動物	多毛	遊泳	ワロシム	<i>Harmothoe imbricata</i>	マダラワロシム亜科	9	環形動物	多毛	遊泳	ワロシム	<i>Harmothoe imbricata</i>	マダラワロシム亜科
10					<i>Harmothoe</i>		10					<i>Harmothoe</i>	
11					<i>Anatides sp.</i>		11					<i>Anatides sp.</i>	
12				サンバコガイ	<i>Eumida sanguinea</i>	マダラサンバ	12					<i>Eumida sanguinea</i>	マダラサンバ
13					<i>Glycinde sp.</i>		13					<i>Glycinde sp.</i>	
14				コガイ	<i>Neanthes caudata</i>	ヒメコガイ	14					<i>Neanthes caudata</i>	ヒメコガイ
15				ニカチロ	<i>Glycinde sp.</i>		15					<i>Glycinde sp.</i>	
16				リノシメ	<i>Schistomeringos sp.</i>		16					<i>Schistomeringos sp.</i>	
17				シオ	<i>Prionospio sp.</i>		17					<i>Prionospio sp.</i>	
18					<i>Polydora sp.</i>		18					<i>Polydora sp.</i>	
19					<i>Cirriformia tentaculata</i>	ミシヒキコガイ	19					<i>Cirriformia tentaculata</i>	ミシヒキコガイ
20					<i>Tharyx sp.</i>		20					<i>Tharyx sp.</i>	
21					<i>Armadia sp.</i>		21					<i>Armadia sp.</i>	
22				オフェリアゴカイ	<i>Capitellidae</i>	イトコガイ科	22					<i>Capitellidae</i>	イトコガイ科
23				イトコガイ	<i>Loimia sp.</i>		23					<i>Loimia sp.</i>	
24				フサコガイ	<i>Thelapsa sp.</i>		24					<i>Thelapsa sp.</i>	
25					<i>Mysinae</i>	アミ亜科	25					<i>Mysinae</i>	アミ亜科
26	節足動物	甲殻	アミ	アミ	<i>Dimorphostylis sp.</i>		26	節足動物	甲殻	アミ	アミ	<i>Dimorphostylis sp.</i>	
27				クマ	<i>Byrrhis japonicus</i>	ニホシスガメ	27					<i>Byrrhis japonicus</i>	ニホシスガメ
28				端脚	<i>Nippopisella nagatai</i>	ドロコエビ	28					<i>Nippopisella nagatai</i>	ドロコエビ
29					<i>Grandidarella japonica</i>	ニホシスガメ	29					<i>Grandidarella japonica</i>	ニホシスガメ
30					<i>Aeroides sp.</i>	エビノコエビ	30					<i>Aeroides sp.</i>	エビノコエビ
31					<i>Liljeborgia sp.</i>	ドロコエビ	31					<i>Liljeborgia sp.</i>	ドロコエビ
32					<i>Caprella rhopalochir</i>	オササリカ	32					<i>Caprella rhopalochir</i>	オササリカ
33					<i>Caprella scaura</i>	トウワラウ	33					<i>Caprella scaura</i>	トウワラウ
34					<i>Alpheus sp.</i>	テッポウエビ	34					<i>Alpheus sp.</i>	テッポウエビ
35				十脚	<i>Athanas lamellifer</i>	ハヤシロウエビ	35					<i>Athanas lamellifer</i>	ハヤシロウエビ
36					<i>Processa sulcata</i>	ハヤシロウエビ	36					<i>Processa sulcata</i>	ハヤシロウエビ
37					<i>Sakaina incisa</i>	ハヤシロウエビ	37					<i>Sakaina incisa</i>	ハヤシロウエビ
38					<i>Megalopa</i>	カニ類	38					<i>Megalopa</i>	カニ類
39					<i>Ophiactis affinis</i>	クサレビ	39					<i>Ophiactis affinis</i>	クサレビ
40	棘皮動物	蛇尾	頭蛇尾	スナモエビ	<i>Ophiactis affinis</i>	クサレビ	40	棘皮動物	蛇尾	頭蛇尾	スナモエビ	<i>Ophiactis affinis</i>	クサレビ
注)区分は、今島(1996, 2001)、および稲葉(1988)による。													

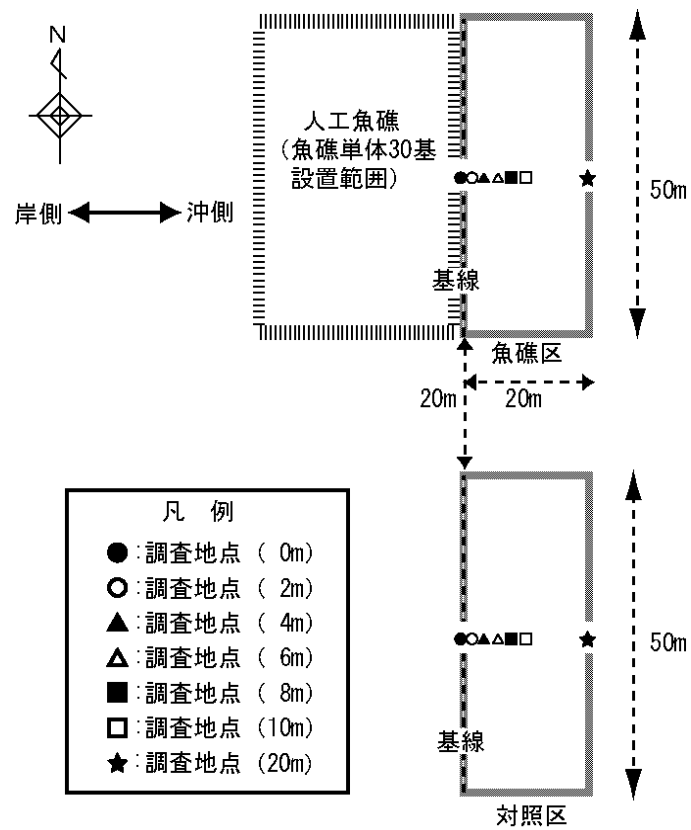


図-1.2.7 マコガレイ稚魚の採捕調査点

表-1.2.2 炭素・窒素安定同位体比分析に用いた試料

試 料		検体数	
		魚礁区	対照区
マコガレイ稚魚	<i>Pseudopleuronectes yokohamae</i>	31	26
餌生物	動物プランクトン	3	3
	底生動物		
	節足動物門カイアシ目ハルパチクス目	1	1
	環形動物門多毛綱ミスヒキコカイ	3	—
			3
	節足動物門端脚目ニホントロソコエビ	3	3
	付着動物		
	節足動物門端脚目トゲヨコエビ属	3	—
	葉上動物		
	節足動物門端脚目ホソヨコエビ	3	—
基礎生産者	POM(懸濁態有機物)	3	3
	MPB(底生微細藻類)	1	1
	SOM(底泥表層の有機堆積物)	1	1
	アカモク	1	—

注)「—」は検体が得られなかったことを示す。

3. 結果

3.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境

2004 年 9 月から 2006 年 9 月における魚礁区の水温は、表層が 8.2~26.8℃, 底層が 8.0~26.9℃であった(図-1.3.1)。塩分は、2004 年 12 月に表層で 27.1, 底層で 27.5 と低い値を示したが、概ね 29.0~31.0 であった。透明度は、概ね 2.0~5.0m で推移した。

底質粒度は、粒径 0.075mm 未満の粘土・シルトの組成が、魚礁区 0m では 70.7%, 魚礁区の他の調査点では 89.2 および 95.2%, 対照区では 94.1% を示した(図-1.3.2)。魚礁区 0m が、魚礁区の他の調査点および対照区に比べてシルト分が少なかった。強熱減量は、魚礁区 0m が 10.9%, 5m が 10.5%, 10m が 9.9% と魚礁から離れるほど有機物量が低下していた(図-1.3.3)。

3.2 調査対象とした人工魚礁および周辺における動物群の分布状況

3.2.1 海藻類と葉上動物

海藻類の出現状況 魚礁単体に着生した大型海藻類は、一年生ホンダワラ類のアカモク *Sargassum horneri*, 多年生ホンダワラ類のヨレモク *Sargassum tortile*, および一年生コンブ類のワカメ *Undaria pinnatifida* の 3 種であった。着生した海藻類の魚礁単体当たりの乾燥重量(dw)は、2005 年 3 月に 1.2kg dw/基と最大となり、翌月は若干減少して、7 月には 0.1kg dw/基未満と最小値を示した(図-1.3.4)。全調査を通して、アカモクが海藻類全体の 90% 以上と優占した。アカモクの葉長は、2005 年 3 月には 140~250cm 程度に生長した。晩春には枯死流失し、7 月には葉長 1 cm 程度の新たな幼体が着生していた。

葉上動物の出現状況 葉上動物の出現分類群数(調査 4 回の累計)は、62 分類群であり、そのうち節足動物門が 34 分類群と全体の 55% を占めた(図-1.3.5)。葉上動物の魚礁単体当たりの湿重量は、ホンダワラ類の湿重量が最大であった 2005 年 3 月に 98.6g/基と最大値を示し、以後は減少し、幼体が萌芽し始めた 7 月には 1.3g/基となった(図-1.3.6)。

次に、葉上動物の主要分類群別湿重量と組成をみると、ホンダワラ類の繁茂する 2005 年 3 月、4 月では節足動物門端脚目が、それぞれ 87.9% および 53.6% と優占していた(図-1.3.7)。節足動物門端脚目の調査回平均の湿重量は 41.5g/kg dw で、その平均湿重量組成は 75.3% であった。また、葉上動物の優占種(優占種には分類群を含む; 以下、優占種)は、節足動物門端脚目モノワレカラ *Caprella monoceros* (24.1%), トゲワレカラ *Caprella scaura* (17.2%), およびマギレワレカラ *Caprella decipiens* (11.6%) などであった(表-1.3.1)。

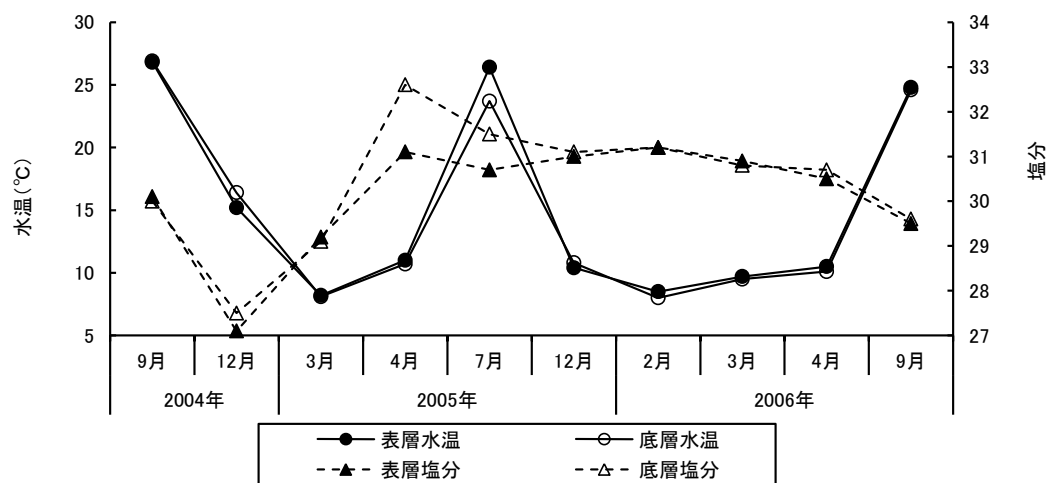


図-1.3.1 魚礁区における調査期間中の水温・塩分

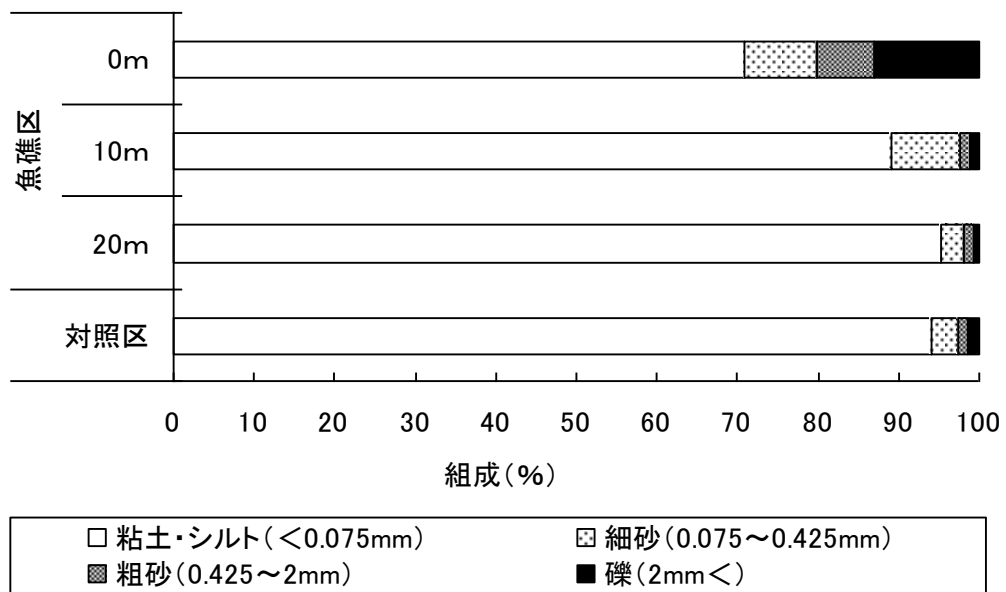


図-1.3.2 粒度組成 (2005 年 4 月)

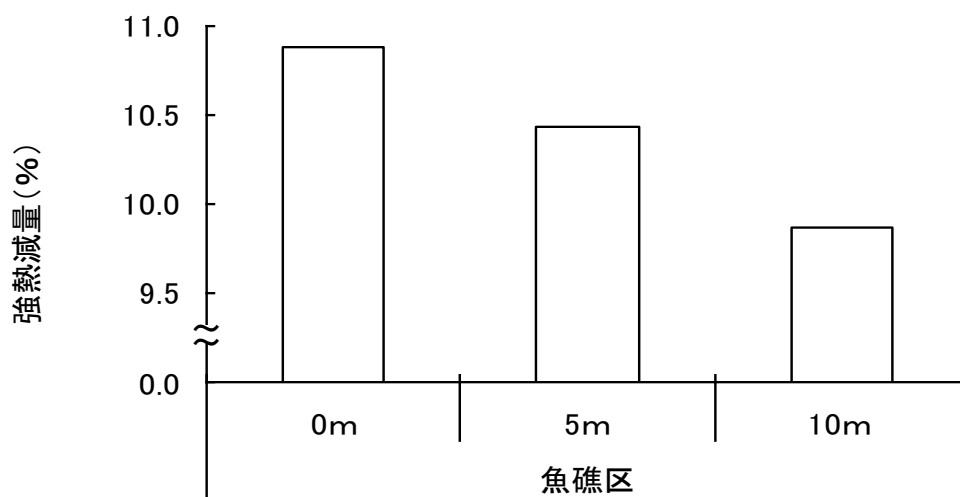


図-1.3.3 底質の強熱減量 (2005 年 4 月)

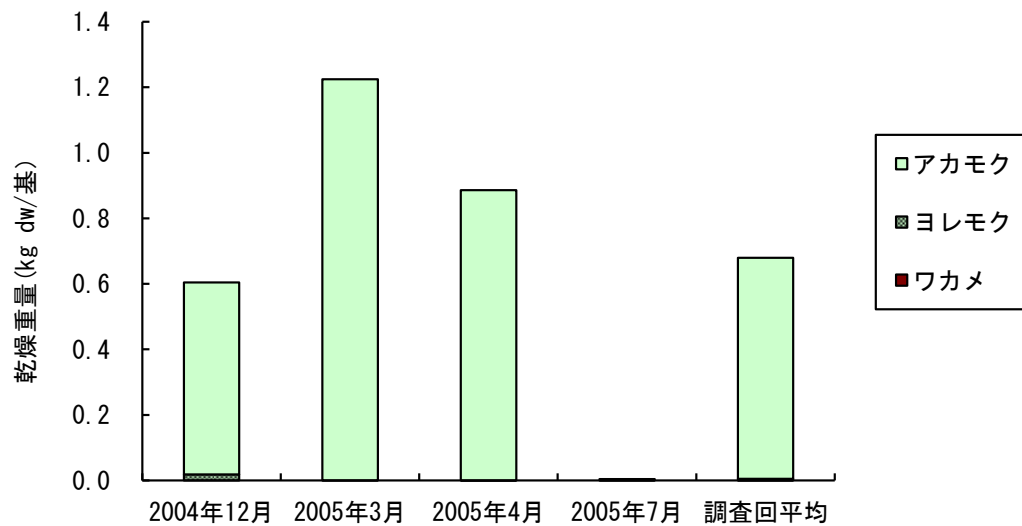


図-1.3.4 海藻類の乾燥重量（魚礁単体当たり）

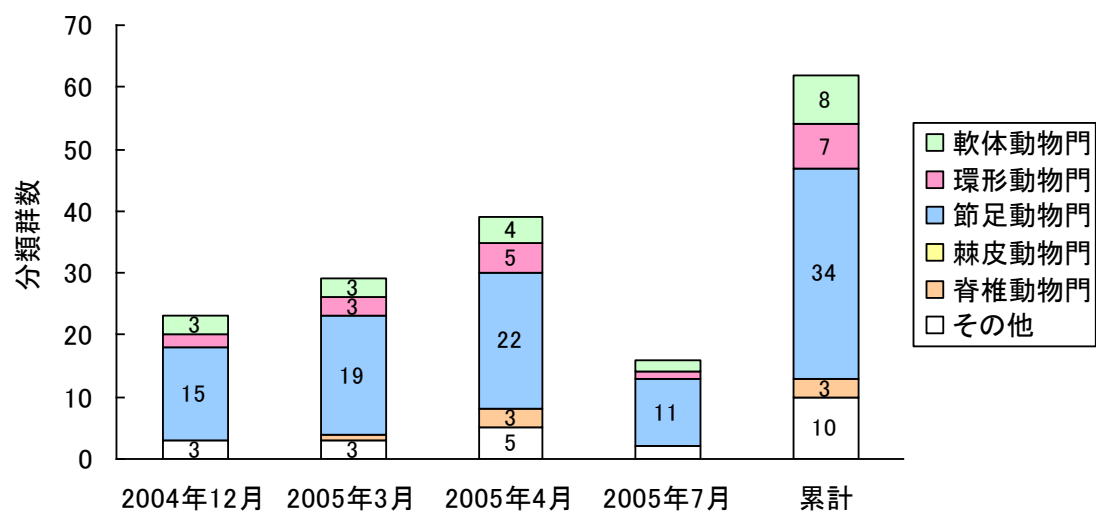


図-1.3.5 葉上動物の出現分類群数

注) 図中の数字は分類群数を示す。

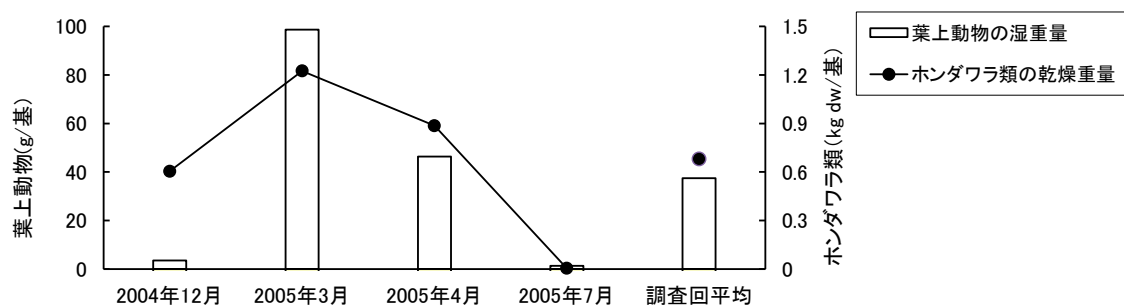


図-1.3.6 葉上動物とホンダワラ類の出現重量（魚礁単体当たり）

注）葉上動物は湿重量をホンダワラ類は乾燥重量を示す。

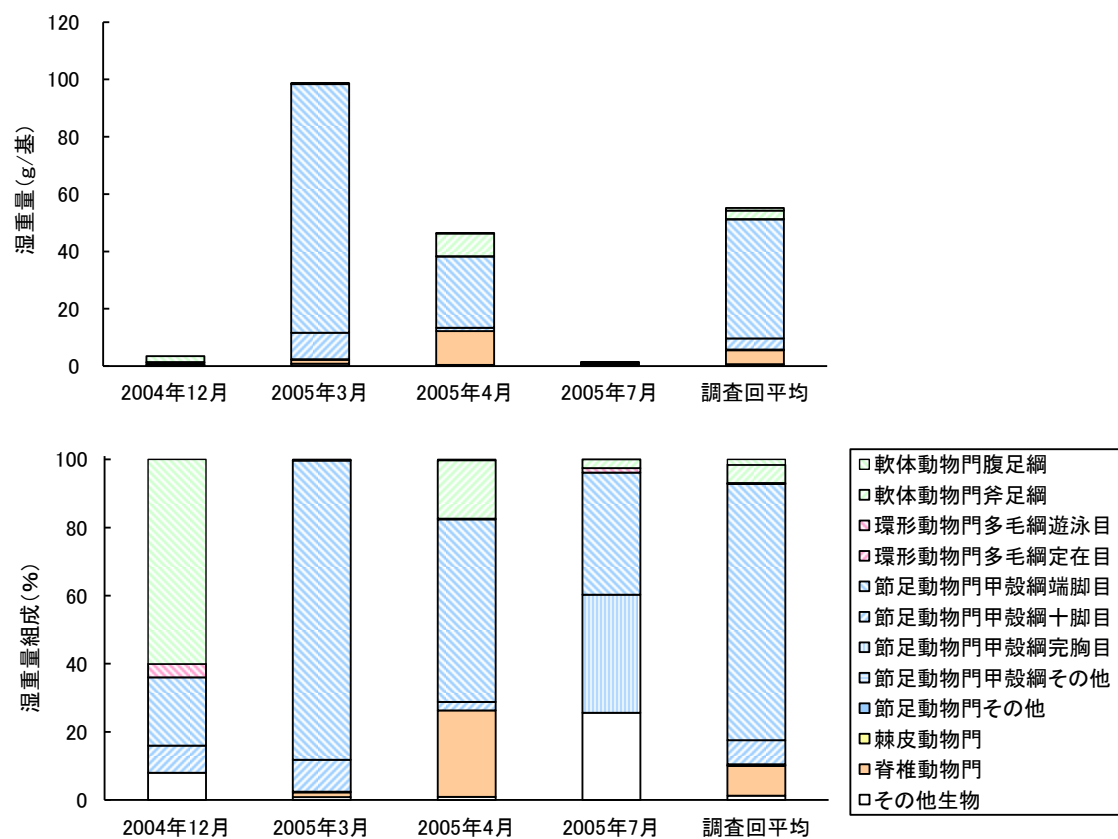


図-1.3.7 葉上動物の主要分類群別湿重量と組成

表-1.3.1 葉上動物の優占種（調査回平均の上位5種）

分 類 群 名				湿重量 (g/kg dw)	組 成 (%)
節足動物門	端脚目	モノワレカウ	<i>Caprella monoceros</i>	13.27	24.1
		トケワレカウ	<i>Caprella scaura</i>	9.48	17.2
		マギレワレカウ	<i>Caprella decipiens</i>	6.37	11.6
		アゴナガヨコエ属	<i>Pontogeneia</i>	4.94	9.0
節足動物門	十脚目	ヤマトモエビ	<i>Eualus leptognathus</i>	3.79	6.9

注) 湿重量はホンダワラ類の乾燥重量当たりを示す。

3.2.2 付着動物

付着動物の出現分類群数（調査 5 回の累計）は、貝殻基質が 167 分類群、コンクリート基質が 140 分類群であった（図-1.3.8）。付着動物の主要分類別の湿重量（調査回平均）は、節足動物門完胸目が貝殻基質で 277.7g/テストピース、コンクリート基質で 119.7g/テストピースであり、その湿重量割合はそれぞれ 49%と 69%を示した（図-1.3.9）。付着動物における出現分類群数および主要分類別の湿重量は、基質別では貝殻基質がコンクリート基質に比べ高い結果であった。また、付着動物の優占種は、両基質ともに節足動物門完胸目のサンカクフジツボ *Balanus trigonus* (48.6%, 68.5%), 軟体動物門斧足綱のコケゴロモガキ *Ostrea circumpicta* (9.0%, 9.4%), および貝殻基質では原索動物門のスジキレボヤ *Ascidia sydneiensis* (18.5%), コンクリート基質ではシロウスボヤ *Didemnum moseleyi* (3.3%) などであった（表-1.3.2）。

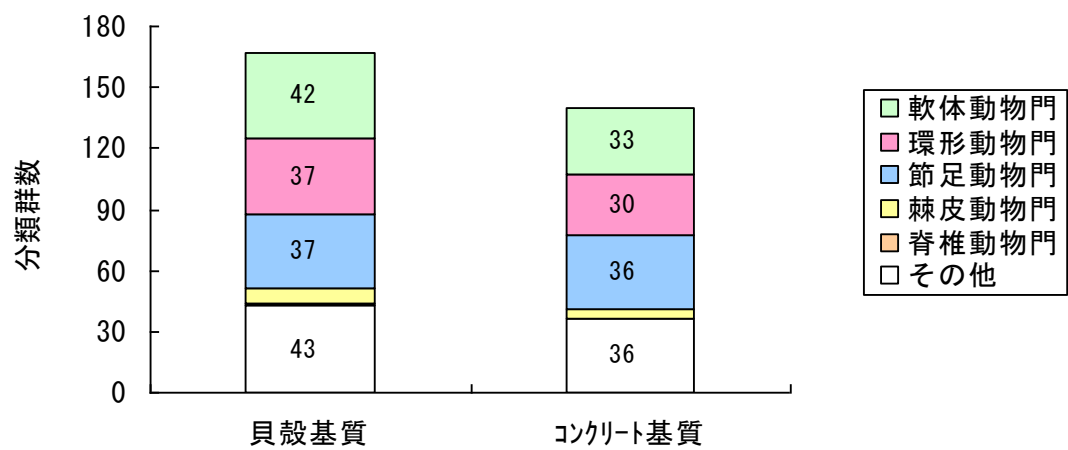


図-1.3.8 付着動物の出現分類群数（調査5回の累計）

注）図中の数字は分類群数を示す。

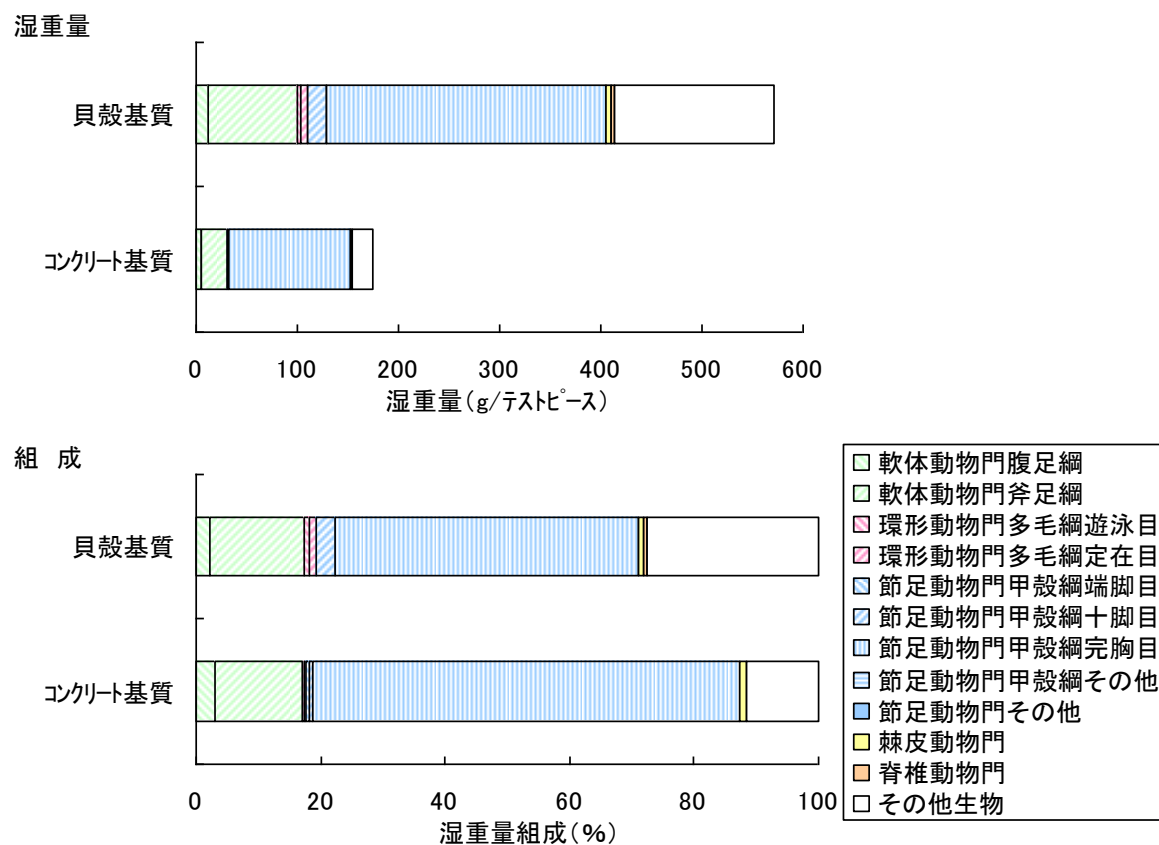


図-1.3.9 付着動物の主要分類群別湿重量と組成（調査5回の平均）

表-1.3.2 付着動物の優占種（調査5回の平均；上位5種）

貝殻基質					
分 類 群 名				湿重量 (g/テストピース)	組 成 (%)
節足動物門	完胸目	サンカクジツホ	<i>Balanus trigonus</i>	277.71	48.6
原索動物門		スジキホヤ	<i>Ascidia sydneiensis</i>	105.46	18.5
軟体動物門	斧足綱	コケロモガキ	<i>Ostrea circumpicta</i>	51.34	9.0
		ナミガシロガイ	<i>Anomia chinensis</i>	11.15	2.0
原索動物門		ミスジデムニ	<i>Trididemnum savignii</i>	10.27	1.8
コンクリート基質					
分 類 群 名				湿重量 (g/テストピース)	組 成 (%)
節足動物門	完胸目	サンカクジツホ	<i>Balanus trigonus</i>	119.71	68.5
軟体動物門	斧足綱	コケロモガキ	<i>Ostrea circumpicta</i>	16.49	9.4
原索動物門		シロウスホヤ	<i>Didemnum moseleyi</i>	5.83	3.3
軟体動物門	腹足綱	ムギガイ	<i>Mitrella bicincta</i>	5.05	2.9
原索動物門		ミスジウスホヤ属	<i>Trididemnum</i>	3.17	1.8

3.2.3 底生動物

底生動物の出現状況 底生動物の調査点毎の出現分類群数（調査4回の累計）は、魚礁区0mで121分類群、5mで61分類群、10mで59分類群、および対照区で48分類群と、基点から離れるに従って減少する傾向がみられた（図-1.3.10）。底生動物の主要分類群別の湿重量（調査4回の平均）は、魚礁区0mで55.5g/m²であったが、魚礁区の他の調査点および対照区では6.3～11.5g/m²の範囲にあり、魚礁区0mが高かった（図-1.3.11）。魚礁区0mの底生動物の主要分類群別の湿重量およびその組成をみると軟体動物門、棘皮動物門、および環形動物門の順で、これら3分類群で46.7g/m²、その組成は84%を占めた。また、魚礁区0mにおける優占種は、棘皮動物門のオカメブンブク *Echinocardium cordatum* (16.1%)、サンショウウニ *Temnopleurus toreumaticus* (11.6%)、および軟体動物門斧足綱のヒメシラトリ *Macoma incongrua* と (15.9%) シズクガイ *Theora lata* (10.6%) であった（表-1.3.3）。

多様度指数は調査月により差はあるものの、2005年7月と12月は、魚礁区0mが他の調査地点に比べて高く、2005年4月と2006年9月では差は減少していた（表-1.3.4）。

底生動物の生活様式による区分 底生動物を今島（1996, 2001）、および稲葉（1988）に従って生活様式で区分し、区分別の湿重量を魚礁区の各調査点および対照区で比較した（図-1.3.12）。区分別の湿重量は、魚礁区0mがA群（主に底質中および底質表面に生息する種）、B群（主に基質に固着・潜入する種）、およびC群（A群とB群の両環境中に生息する種）ともに、魚礁区の他の調査点、および対照区と比較して高かった。A群は、魚礁区および対照区のすべての調査点で出現したが、魚礁区0mにおいて41.5g/m²と他の調査点と比べに高い値を示した。B群は、魚礁区0mで5.0g/m²であったが、魚礁区の他の調査点および対照区では出現しなかった。C群についても魚礁区0mにおいて9.0g/m²と他の調査点よりも高い値を示した。魚礁区0mにおける生活様式別の優占種は、A群が棘皮動物門のオカメブンブク、サンショウウニ、および軟体動物門斧足綱のヒメシラトリなどであった（表-1.3.5）。B群が原索動物門のエボヤ *Styela clava*、節足動物門完胸目のサンカクフジツボ *Balanus trigonus*、および海綿動物門のイソカイメン属 *Halichondria* などであった。C群が環形動物門定在目のミズヒキゴカイ *Acrocirrus validus*、*Lomia* sp.、および軟体動物門斧足綱のホトトギス *Musculus senhousia* などであった。

底生動物と葉上動物、底生動物と付着動物との間で共通して出現した分類群数を整理した（表-1.3.6）。共通数は、魚礁区0mで底生動物と葉上動物とで11分類群、底生動物と付着動物とで35分類群であった。

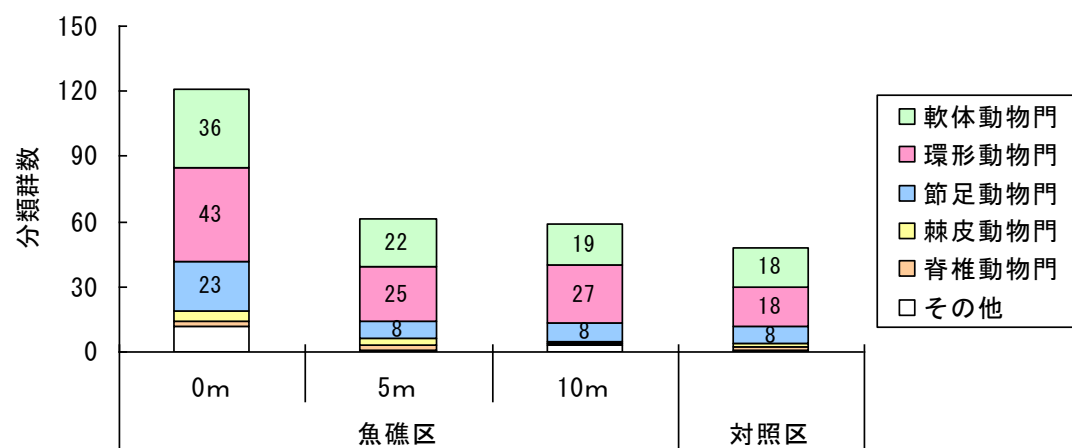


図-1.3.10 底生動物の基点からの距離別の出現分類群数（調査4回の累計）
 注）図中の数字は分類群数を示す。

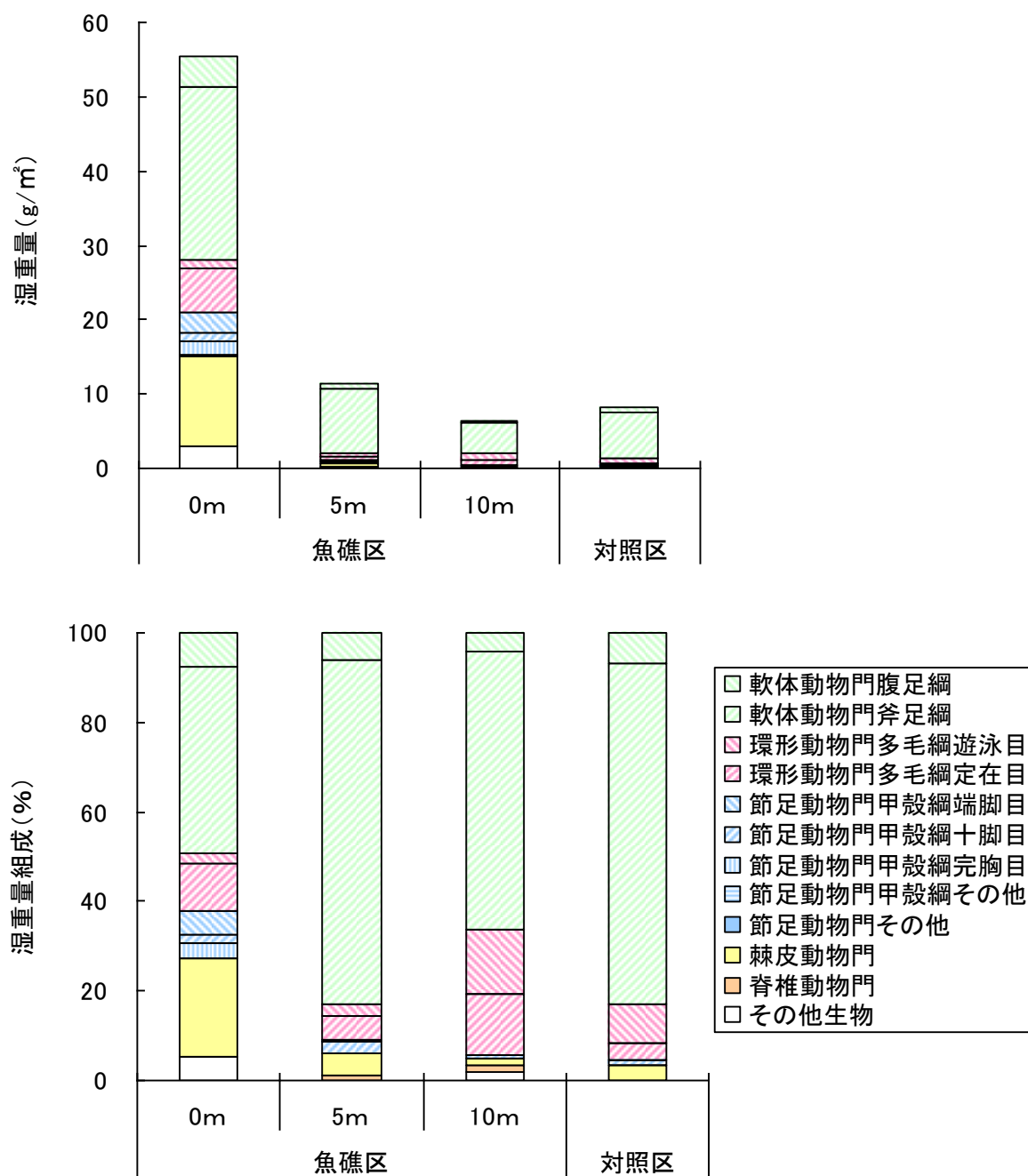


図-1.3.11 底生動物の基点からの距離別の主要分類群別の湿重量と組成
(調査4回の平均)

表-1.3.3 魚礁区 0mの底生動物の優占種（調査 4 回平均の上位 5 種）

分 類 群 名				湿重量 (g/m ²)	組 成 (%)
棘皮動物門	海胆綱	カメフツヅク	<i>Echinocardium cordatum</i>	6.78	16.1
軟体動物門	斧足綱	ヒメシラトリ	<i>Macoma incongrua</i>	6.69	15.9
棘皮動物門	海胆綱	サンショウウ	<i>Temnopleurus toreumaticus</i>	4.88	11.6
軟体動物門	斧足綱	シスヅカイ	<i>Theora lata</i>	4.45	10.6
環形動物門	定在目	ミスヒキゴカイ	<i>Acrocirrus validus</i>	1.70	4.0

表-1.3.4 底生動物の多様度（シャノン・ウィーバーの H' ）

		2005年			2006年
		4月	7月	12月	9月
魚礁区	0m	3.80	3.56	3.13	4.08
	5m	—	2.60	2.30	3.87
	10m	3.80	2.20	2.22	3.95
対照区		4.10	1.81	—	3.96

注）「—」は調査を実施していないことを示す。

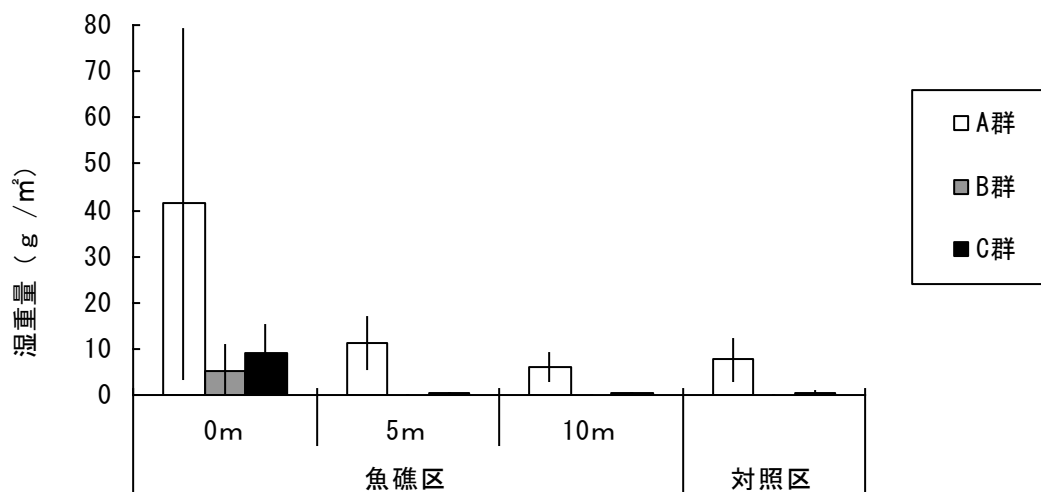


図-1.3.12 底生動物の生活様式別の湿重量（調査4回の平均）

注）エラーバーは標準偏差を示す。

表-1.3.5 魚礁区 0mの底生動物の生活様式別優占種（調査回平均の上位5種）

分類群名				湿重量 (g/m²)	組成 (%)
A群	棘皮動物門	オカメソウク	<i>Echinocardium cordatum</i>	6.78	16.1
	軟体動物門斧足綱	ヒメシラトリ	<i>Macoma incongrua</i>	6.69	15.9
	棘皮動物門	サンショウウニ	<i>Temnopleurus toreumaticus</i>	4.88	11.6
	軟体動物門斧足綱	シスヅカイ	<i>Theora lata</i>	4.45	10.6
		ゴイサギカイ	<i>Macoma tokyoensis</i>	1.63	3.9
B群	原索動物門	エホヤ	<i>Styela clava</i>	0.76	1.8
	節足動物門完胸目	サンカクソウホ	<i>Balanus trigonus</i>	0.70	1.7
	海綿動物門	イソカイメン属	<i>Halichondria</i>	0.53	1.2
	原索動物門	シロウスホヤ	<i>Didemnum moseleyi</i>	0.13	0.3
	軟体動物門腹足綱	カゴメガイ	<i>Bedeleva birileffi</i>	0.13	0.3
C群	環形動物門定在目	ミスヒキゴカイ	<i>Acrocirrus validus</i>	1.70	4.0
	軟体動物門斧足綱	ホトギス	<i>Musculus senhousia</i>	1.41	3.3
	環形動物門定在目	Loimia sp.		1.29	3.1
	端脚目	ニホントロコエビ	<i>Grandidierella japonica</i>	0.97	2.3
	定在目	Tharyx sp.		0.14	0.3

表-1.3.6 底生動物と葉上動物，付着動物との共通出現分類群数（全調査）

□		底生動物 種類数	底生動物との共通種数			
			葉上動物	(%)	付着動物	(%)
魚礁区	0m	121	11	(9)	35	(29)
	5m	61	2	(3)	5	(8)
	10m	59	3	(5)	8	(14)
対照区		48	2	(4)	7	(15)

3.3 マコガレイ稚魚の蛸集状況

マコガレイ稚魚の分布と生息密度 2005年4月13日の魚礁区でのマコガレイ稚魚の生息密度（平均±標準偏差）は、魚礁区 0mで 11.2（±3.4）個体/m²と最も高く、魚礁区 2mで 8.0（±0）個体/m²、4mで 5.3（±6.1）個体/m²と基点から離れるに伴い減少し、6m以遠では 1.3（±2.3）～2.4（±2.2）個体/m²と低い値となった（図-1.3.13）。対照区は魚礁区 6m以遠と同程度の値を示した。

次に、2006年2月23日から4月27日のマコガレイ稚魚の魚礁区および対照区における平均生息密度の推移を図-1.3.14に示した。魚礁区では、2月23日にはマコガレイ稚魚が確認されなかった。3月9日には 0.13 個体/m²とはじめて確認された。4月5日には 0.63 個体/m²と最も高くなり、4月17日には 0.57 個体/m²、4月27日には 0.13 個体/m²となった。一方、対照区では2月23日と3月9日に、マコガレイ稚魚は確認されなかった。4月5日には 0.51 個体/m²が確認され、4月17日には 0.06 個体/m²と魚礁区と比べ低い値を示したが、4月27日には 0.19 個体/m²であった。

マコガレイ稚魚の全長と体重 2006年3月9日から4月27日にかけて、魚礁区で出現したマコガレイ稚魚の平均全長と平均体重を図-1.3.15に示した。マコガレイ稚魚は、3月9日に 15（±1.4）mm、0.04（±0.01）g、4月5日には 14（±2.3）mm、0.03（±0.01）g、4月17日には 28（±11.2）mm、0.30（±0.29）g、および4月27日には 39（±4.2）mm、0.64（±0.29）gであった。3月9日と4月5日の間では平均全長、平均体重ともに大きな差はみられなかったが、4月5日以降27日にかけて増加がみられ、4月5日を基準とし、4月27日では平均全長で約 2.8 倍、平均体重で約 21 倍の成長がみられた。

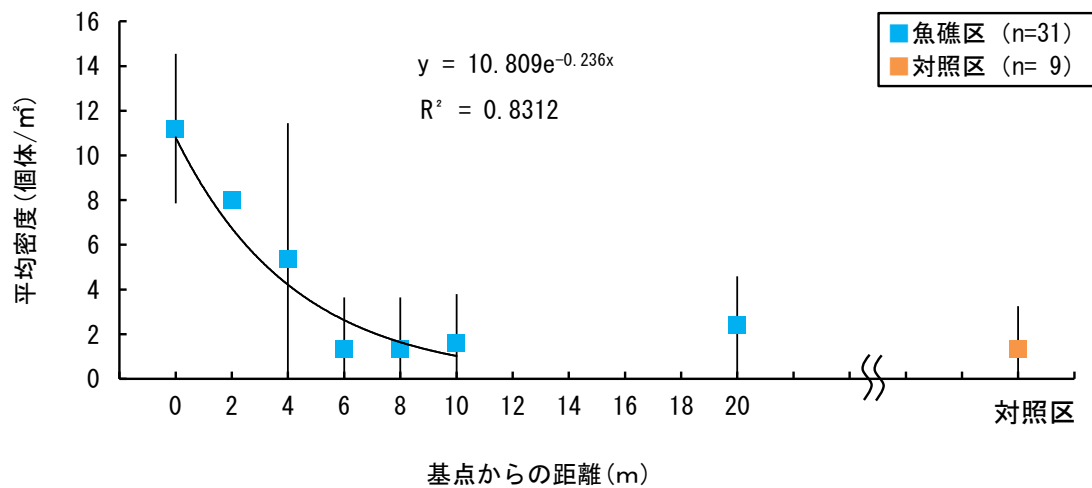


図-1.3.13 マコガレイ稚魚の水平分布（2005 年 4 月 13 日）

注）エラーバーは標準偏差を示す。（n；採取稚魚個体数）

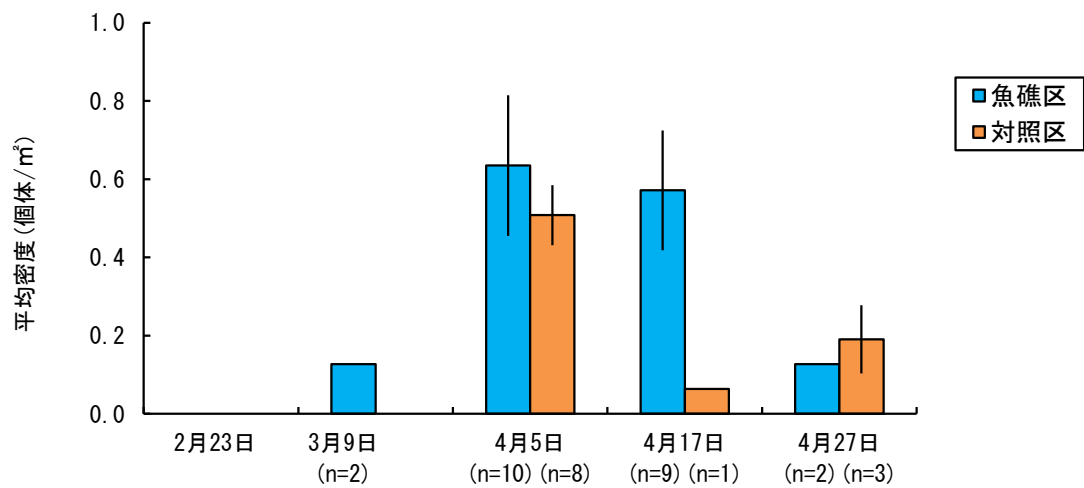


図-1.3.14 マコガレイ稚魚の平均密度の推移（2006 年）

注）エラーバーは標準偏差を示す。（n；採取稚魚個体数）

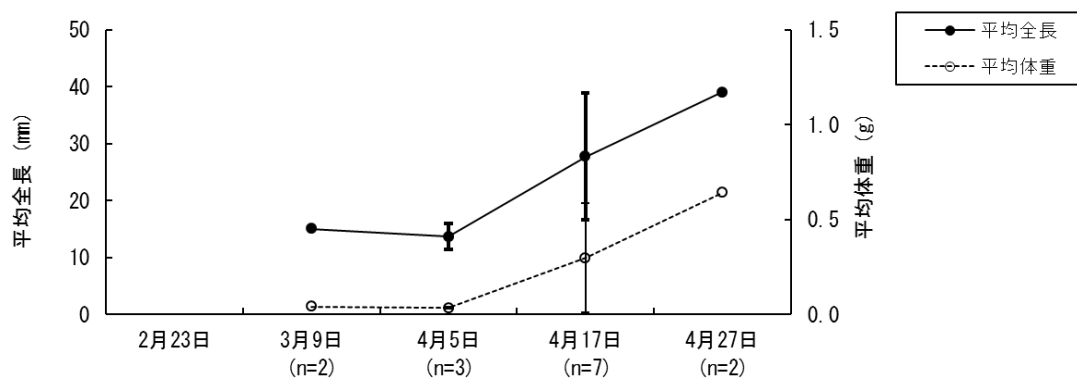


図-1.3.15 魚礁区で出現したマコガレイ稚魚の平均全長と平均体重（2006 年）

注）エラーバーは測定個体の全長および体重の標準偏差を示す。（n；採取稚魚個体数）

3.4 餌生物と食物網

マコガレイ稚魚の全長 2009年4月7日、2012年3月8日と4月16日に魚礁区、対照区で採捕されたマコガレイ稚魚（57個体）の全長組成を表-1.3.7に示した。魚礁区で採捕されたマコガレイ稚魚は、2009年4月7日には平均全長とその標準偏差は 30.9 ± 3.4 mm（9個体）、2012年3月8日は 16.1 ± 2.6 mm（6個体）、4月16日には 32.5 ± 2.0 mm（16個体）であった。対照区では、2009年4月7日は 19.9 ± 1.5 mm（5個体）、2012年3月8日は 14.7 ± 1.8 mm（5個体）、4月16日は 21.8 ± 1.4 mm（8個体）と 32.3 ± 2.7 mm（8個体）の2群であった。

次に、餌生物の解析を進めるに当たり、採捕されたマコガレイ稚魚を全長組成から魚礁区では、平均全長16.1mmのものをⅠ群、平均全長31.9mm（2009年4月7日と2012年4月16日に採取）のものをⅡ群に区分した。対照区では、平均全長14.7mmのものをⅢ群、平均全長21.0mm（2009年4月7日と2012年4月16日に採取）のものをⅣ群および平均全長32.3mmのものをⅤ群の3グループに区分した（図-1.3.16、表-1.3.8）。

マコガレイ稚魚の消化管内容物 魚礁区、対照区において採捕され、Ⅰ～Ⅴ群に区分された平均全長別マコガレイ稚魚の消化管内容物から検出できた動物群の出現個体数組成（%）を表-1.3.9に示した。

魚礁区のⅠ群は、ハルパクチクス目が51.4%、その他のかいあし類が23.6%と合わせて75.0%がかいあし類であった。Ⅱ群はヨコエビ亜目が59.7%、多毛綱が34.5%であった。

対照区のⅢ群は、ハルパクチクス目が46.2%、その他のかいあし類が3.8%で合わせて50.0%、それ以外では二枚貝類（着底初期の稚貝）が38.5%であった。Ⅳ群は、ハルパクチクス目が67.6%、その他のかいあし類が11.1%で、合わせて78.7%であったが、それ以外では多毛綱が15.1%、ヨコエビ亜目が4.3%であった。Ⅴ群は、ヨコエビ亜目48.9%、多毛綱27.7%であった。

マコガレイ稚魚の安定同位体比 魚礁区および対照区におけるマコガレイ稚魚の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の平均値と標準偏差を表-1.3.10に示した。

魚礁区におけるマコガレイ稚魚の $\delta^{13}\text{C}$ 値（平均値 $\pm$ 標準偏差、以下同じ）は、Ⅰ群では -20.1 ± 0.2 ‰、Ⅱ群では -18.0 ± 0.4 ‰、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は 16.0 ± 0.4 ‰、 14.3 ± 0.4 ‰であった。

対照区におけるマコガレイ稚魚の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、Ⅲ群では -20.1 ± 0.2 ‰、Ⅳ群では -18.6 ± 0.3 ‰、Ⅴ群では -17.8 ± 0.2 ‰、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は 15.5 ± 0.5 ‰、 14.2 ± 0.2 ‰、 14.8 ± 0.2 ‰であった。

魚礁区のⅠ群と対照区のⅢ群、魚礁区のⅡ群と対照区のⅤ群のマコガレイ稚

魚の $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{15}\text{N}$ 値には有意な差はみられなかった (U 検定, I 群と III 群の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $P > 0.05$, II 群と V 群の $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$, $P > 0.05$)。

魚礁区, 対照区におけるマコガレイ稚魚の平均全長と $\delta^{13}\text{C}$ の関係を図-1.3.17 に示した。マコガレイ稚魚の平均全長が大きくなるにつれて, $\delta^{13}\text{C}$ 値は増加する傾向にあり, 平均全長15mm前後 (魚礁区の I 群, 対照区の III 群) のマコガレイ稚魚の平均 $\delta^{13}\text{C}$ 値は -20.1‰ , 平均全長21.0mm (対照区の IV 群) は -18.5‰ , 平均全長30mm以上 (魚礁区の II 群, 対照区の V 群) では -18.0 , -17.7‰ であった。

餌生物の安定同位体比 魚礁区および対照区で採取された, マコガレイ稚魚の消化管内容物から出現した主な餌生物 (ハルパクチクス目, 動物プランクトン, 底生動物の多毛綱, ヨコエビ亜目および葉上動物や付着動物のヨコエビ亜目) の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の平均値を表-1.3.11 に示した。

平均全長15mm前後のマコガレイ稚魚 (魚礁区; I 群, 対照区; III 群) の消化管内容物で主な餌であったハルパクチクス目の魚礁区, 対照区の $\delta^{13}\text{C}$ 値は -21.0‰ , -21.2‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 値は 12.8‰ , 13.2‰ であった。

消化管内容物で出現したその他かいあし類を含む動物プランクトンの魚礁区, 対照区の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-20.4 \pm 0.1\text{‰}$, $-20.2 \pm 0.1\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 値は $11.8 \pm 0.1\text{‰}$, $12.1 \pm 0.1\text{‰}$ を示した。魚礁区, 対照区間の値には有意な差はみられなかった (U 検定, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $P > 0.05$)。

平均全長30mmを超えたマコガレイ稚魚 (魚礁区; II 群, 対照区; V 群) の消化管内容物で主な餌である多毛綱 (底生動物) の魚礁区, 対照区の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-18.9 \pm 0.3\text{‰}$, $-18.8 \pm 0.2\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 値は $11.8 \pm 0.5\text{‰}$, $11.7 \pm 0.4\text{‰}$ を示した。魚礁区, 対照区間の値には有意な差はみられなかった (U 検定, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $P > 0.05$)。

魚礁区および対照区で採取された底生動物のヨコエビ亜目の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-18.7 \pm 0.1\text{‰}$, $-18.5 \pm 0.3\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 値は $11.5 \pm 0.4\text{‰}$, $10.8 \pm 0.4\text{‰}$ を示した。魚礁区, 対照区間の値には有意な差はみられなかった (U 検定, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $P > 0.05$)。

魚礁区の付着動物と葉上動物のヨコエビ亜目の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-18.6 \pm 0.1\text{‰}$, $-19.9 \pm 0.3\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 値は $10.1 \pm 0.5\text{‰}$, $11.3 \pm 0.3\text{‰}$ であった。

また, 魚礁区では, 底生動物の多毛綱と葉上動物のヨコエビ亜目の $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{15}\text{N}$ 値に有意な差はみられなかった (U 検定, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $P > 0.05$)。対照区では, 底生動物の多毛綱とヨコエビ亜目の $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{15}\text{N}$ 値に有意な差はみられなかった (U 検定, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $P > 0.05$)。

これらの結果から, 魚礁区における平均全長30mm以上のマコガレイ稚魚の食物連鎖の推定および寄与率の検討には, 底生動物 (多毛綱) と葉上動物 (ヨコ

エビ亜目), 対照区では底生動物の多毛綱とヨコエビ亜目は区別せず扱うこととした。

基礎生産者の安定同位体比 海域の基礎生産者 (POM, MPBおよびアカモク) とSOMの $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の平均値を表-1.3.12 に示した。

POMの魚礁区, 対照区の $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-20.1 \pm 0.2\text{‰}$, $-21.1 \pm 0.3\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 値は $8.8 \pm 0.1\text{‰}$, $8.5 \pm 0.1\text{‰}$, MPBの魚礁区, 対照区の $\delta^{13}\text{C}$ 値は -17.4‰ と -17.6‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 値は 7.5‰ , 7.6‰ であった。SOMの魚礁区, 対照区の $\delta^{13}\text{C}$ 値は -22.2‰ , -22.1‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 値は 10.1‰ , 10.0‰ であった。魚礁区のアカモクの $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{15}\text{N}$ 値は -21.0‰ , 8.5‰ となり, POMとほぼ同じ値を示した。

安定同位体による食物連鎖の推定 マコガレイ稚魚と餌生物である底生動物, 葉上動物および付着動物のヨコエビ亜目, 基礎生産者のPOM, MPB, SOMの $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{15}\text{N}$ 値の分布を図-1.3.18 (上, 魚礁区; 下, 対照区) に示した。

$\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の濃縮係数 (S) をそれぞれ 1.0‰ と 3.4‰ とすると魚礁区, 対照区の I 群, III群である平均全長15mm前後のマコガレイ稚魚 ($\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の各平均値; 表-1.3.10) の餌生物候補が示す位置は, $\delta^{13}\text{C}$ 値では -21‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 値では 13‰ となり, 魚礁区, 対照区ともハルパクチクス目の値と重なり, このサイズのマコガレイ稚魚は, 主にハルパクチクス目を摂餌することが示された。また, 同様に濃縮係数を当てはめると両区点のハルパクチクス目の食物網の一段階下にはSOMの値に近似した (食物連鎖-1, 3)。

魚礁区, II群の平均全長30mm以上のマコガレイ稚魚 ($\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の各平均値; 表-1.3.10) の餌生物候補が示す位置は, $\delta^{13}\text{C}$ 値では -19‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 値では 11‰ となる。この値は底生動物, 葉上動物および付着動物のヨコエビ亜目のそれぞれの $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{15}\text{N}$ 値に囲まれた三角形の重心付近の値となった (食物連鎖-2)。これら3種の餌生物候補としての寄与率 (CR) は, それぞれ31%, 38%, 31% であった (表-1.3.13)。また, 3種のヨコエビ亜目の, 基礎生産者 (POMとMPB) となるPOMの寄与率は72%, 76%, 52% であった (表-1.3.14)。

対照区, IV群の平均全長21.0mmのマコガレイ稚魚 ($\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の各平均値; 表-1.3.10) が示す餌生物候補の位置は, $\delta^{13}\text{C}$ 値は -19.5‰ , $\delta^{15}\text{N}$ は 11.0‰ となり, ハルパクチクス目と底生動物のヨコエビ亜目に近似した。対照区, V群の平均全長30mm以上のマコガレイ稚魚 ($\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の各平均値; 表-1.3.10) が示す餌生物は底生動物のヨコエビ亜目が近似した (食物連鎖-4)。底生動物のヨコエビ亜目は, POMを56%, MPBを44%の割合で利用していた。

また, マコガレイ稚魚の炭素源を推定するため, マコガレイ稚魚に対する基礎生産者 (POMとMPB) の寄与率を求めた。魚礁区, II群のマコガレイ稚魚はPOM

が57%，対照区，V群ではPOMが60%となり，POMとMPBの両者が炭素源となっていることが推定された（表-1.3.15）。

表-1.3.7 マコガレイ稚魚の全長組成 (mm)

調査年月	2009.4.7	2012.3.8	2012.4.16
魚礁区	30.9±3.4 (9)	16.1±2.6 (6)	32.5±2.0 (16)
対照区	19.9±1.5 (5)	14.7±1.8 (5)	21.8±1.4 (8)
			32.3±2.7 (8)

注) 平均全長 ± 標準偏差, (); マコガレイ稚魚のサンプル数。

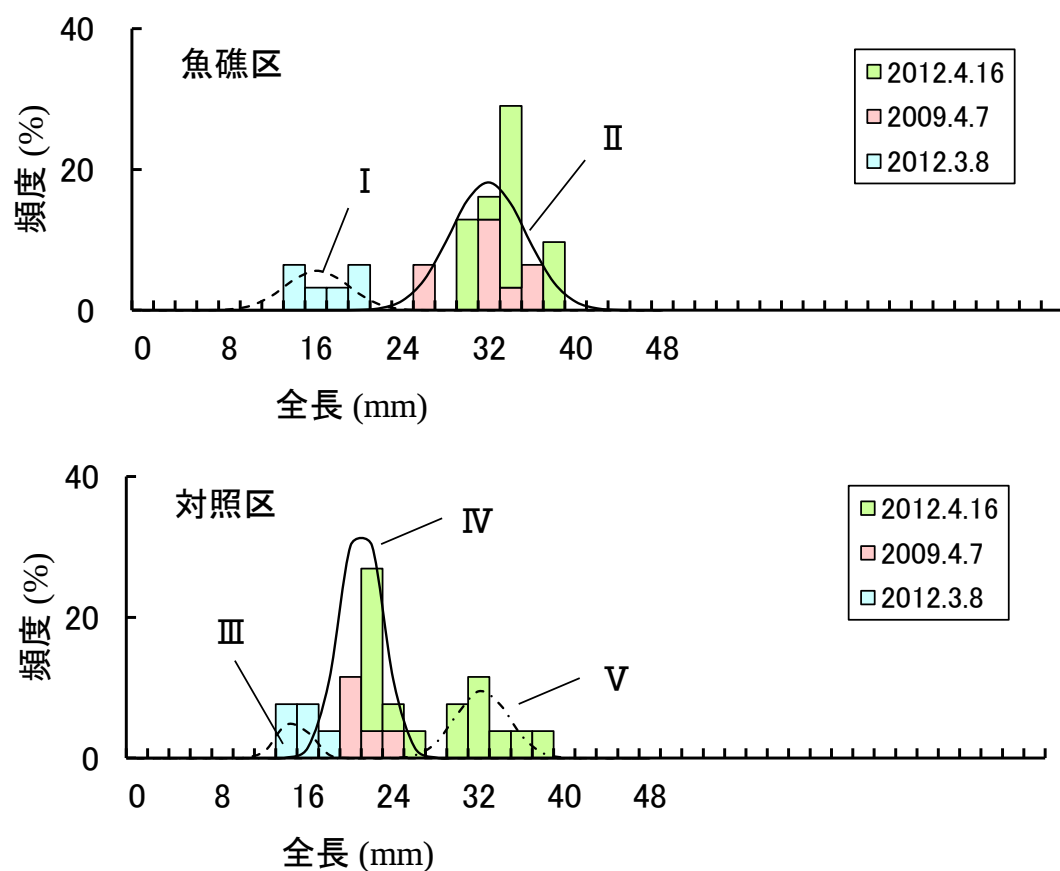


図-1.3.16 魚礁区と対照区のマコガレイ稚魚の全長組成

表-1.3.8 マコガレイ稚魚の平均全長 (mm) に基づいた区分

	I 群	II 群	III 群	IV 群	V 群
魚礁区	16.1±2.4 (6)	31.9±2.9 (25)	—	—	—
対照区	—	—	14.7±1.6 (5)	21.0±1.7 (13)	32.3±2.5 (8)

注) 平均全長 ± 標準偏差, (); マコガレイ稚魚のサンプル数。

表-1.3.9 マコガレイ稚魚の消化管内容物の出現個体数組成 (%)

分 類 群 名					区分	魚礁区		対照区		
						I	II	III	IV	V
						平均全長 (mm)	16.1(6)	31.9(25)	14.7(5)	21.0(15)
節足動物門	甲殻綱	貝虫亜綱	ポドコーパ目	Podocopa	0.0	0.6	0.0	1.2	6.4	
	顎脚綱	橈脚亜綱	ハルパクテクス目	Harpacticoida	51.4	0.0	46.2	67.6	8.5	
			その他	Other copepoda	23.6	3.9	3.8	11.1	6.4	
			軟甲綱	タイナス目	Tanaidacea	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
		クーマ目	Cumacea	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0		
		アミ目	Mysidacea	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1		
		端脚目	ヨコエビ亜目	Gammaridea	6.9	59.7	11.5	4.3	48.9	
			ワレカラ亜目	Caprellidea	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	
	環形動物門	多毛綱		POLYCHAETA	0.0	34.5	0.0	15.1	27.7	
軟体動物門	腹足綱		GASTROPODA	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0		
	二枚貝綱		BIVALVIA	18.1	1.5	38.5	0.8	0.0		

注) (); マコガレイ稚魚のサンプル数。

表-1.3.10 マコガレイ稚魚の区分毎の $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ の平均値と標準偏差

	区分	平均全長 (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ ‰の平均値と 標準偏差	$\delta^{15}\text{N}$ ‰の平均値と 標準偏差	サンプル数
魚礁区	I	16.1	-20.1 ± 0.2	16.0 ± 0.4	6
	II	31.9	-18.0 ± 0.4	14.3 ± 0.4	25
対照区	III	14.7	-20.1 ± 0.2	15.5 ± 0.5	5
	IV	21.0	-18.6 ± 0.3	14.2 ± 0.2	13
	V	32.3	-17.8 ± 0.2	14.8 ± 0.2	8

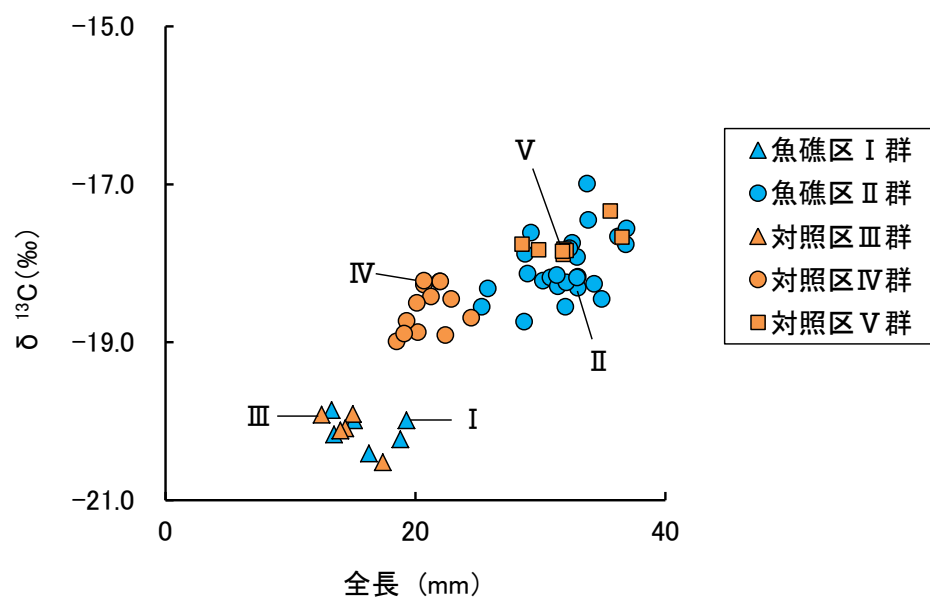


図-1.3.17 マコガレイ稚魚の全長 (mm) と $\delta^{13}\text{C}$ (‰) の関係

表-1.3.11 消化管内容物から検出された主な餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の平均値と標準偏差 (‰)

区 分		分 類 群 名		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	サンプル 数
魚礁区	動物プランクトン			-20.4±0.1	11.8±0.1	3
	底生動物	節足動物門カイアシ目	ハルパクチス目 Harpacticoida	-21.0	12.8	1
		環形動物門多毛綱	ミスヒキコカイ <i>Cirriformia tentaculata</i>	-18.9±0.3	11.8±0.5	3
		節足動物門端脚目	ニホントロコエビ <i>Grandidierella japonica</i>	-18.7±0.1	11.5±0.4	3
	付着動物	節足動物門端脚目	トゲヨコエビ属 <i>Liljeborgia sp.</i>	-18.6±0.1	10.1±0.5	3
	葉上動物	節足動物門端脚目	ホソコエビ <i>Erichthonius pugnax</i>	-19.9±0.3	11.3±0.3	3
対照区	動物プランクトン			-20.2±0.1	12.1±0.1	3
	底生動物	節足動物門カイアシ目	ハルパクチス目 Harpacticoida	-21.2	13.2	1
		節足動物門端脚目	ニホントロコエビ <i>Grandidierella japonica</i>	-18.5±0.3	10.8±0.4	3
		環形動物門多毛綱	<i>Lysilla sp.</i>	-18.8±0.2	11.7±0.4	3

表-1.3.12 海域の基礎生産者と SOM の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の平均値と標準偏差 (‰)

	種名	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	サンプル数
魚礁区	POM	-20.1 ± 0.2	8.8 ± 0.1	3
	MPB	-17.4	7.5	1
	SOM	-22.2	10.1	1
	アカモク	-21.0	8.5	1
対照区	POM	-21.1 ± 0.3	8.5 ± 0.1	3
	MPB	-17.6	7.6	1
	SOM	-22.1	10.0	1

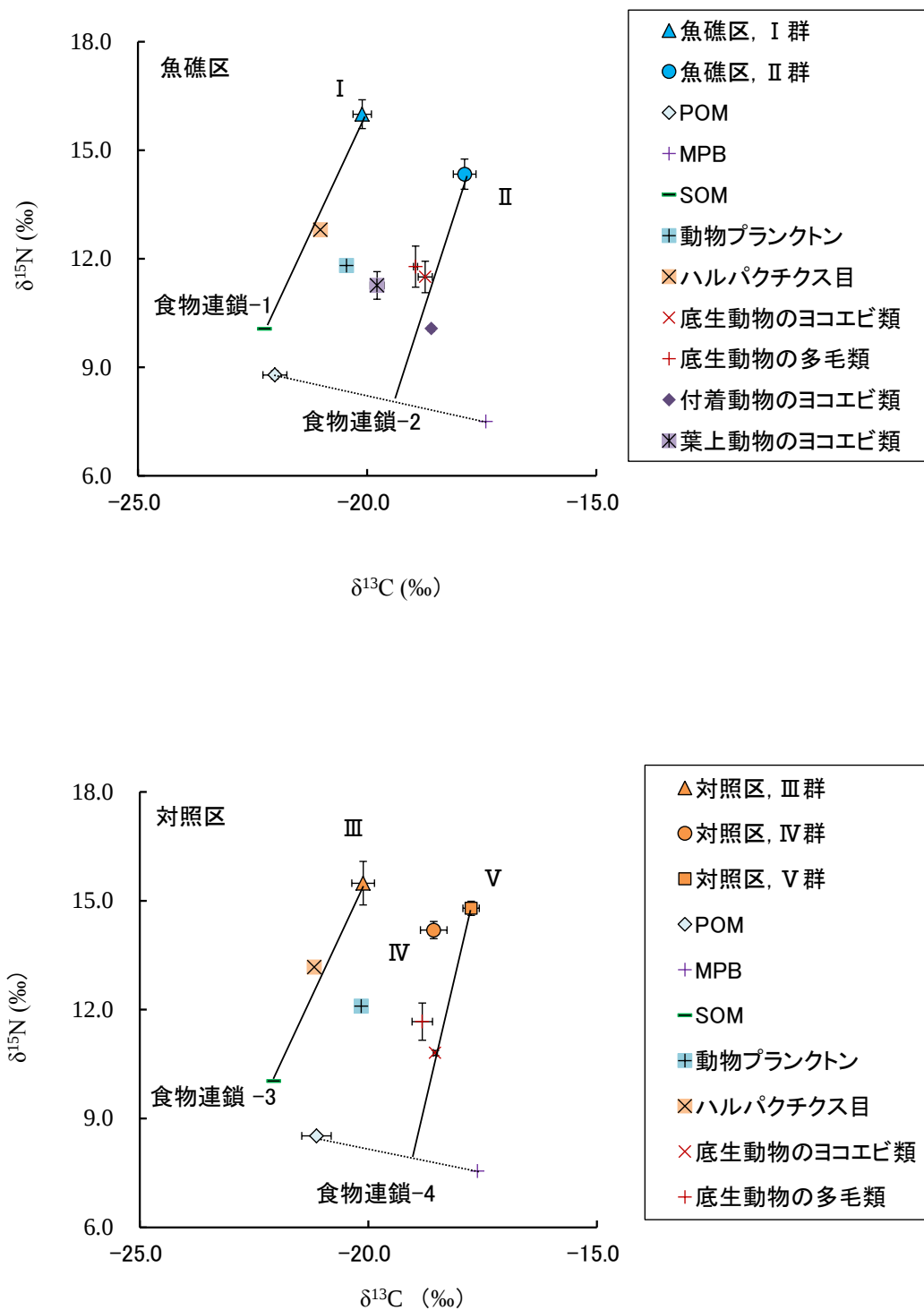


図-1.3.18 魚礁区（上）と対照区（下）におけるマコガレイ稚魚と一次消費者，基礎生産者および SOM の $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ の分布

表-1.3.13 マコガレイの稚魚に対する餌生物の寄与率（％）

	平均全長 (mm)	マコガレイ稚魚に対する餌生物		
		底生動物	葉上動物	付着動物
マコガレイ稚魚	31.9	31	38	31

表-1.3.14 餌生物に対する基礎生産者の寄与率（％）

区分	分類群名	魚礁区		対照区	
		POM	MPB	POM	MPB
底生動物 節足動物門端脚目 ニホントロコエビ	<i>Grandidierella japonica</i>	72	28	56	44
葉上動物 節足動物門端脚目 ホソコエビ	<i>Erichthonius pugnax</i>	76	24	—	—
付着動物 節足動物門端脚目 トゲコエビ属	<i>Liljeborgia</i> sp.	52	48	—	—

表-1.3.15 マコガレイ稚魚に対する基礎生産者の寄与率（％）

区分	魚礁区		対照区	
	Ⅱ		Ⅴ	
	POM	MPB	POM	MPB
マコガレイ稚魚	57	43	60	40

4. 考察

2004 年 9 月から 2006 年 9 月における魚礁区の水温は、表層が 8.2~26.8℃、底層が 8.0~26.9℃であった（図-1.3.1）。塩分は、概ね 29.0~31.0 であった。マコガレイの摂餌活動は 5~27℃の範囲とされることから（落合ら，1998），本研究を行った調査期はマコガレイ稚魚の蛸集機能を評価する調査期として妥当であると判断された。

人工魚礁の餌場機能 人工魚礁に着生したアカモクなどの海藻類に生息する葉上動物の増減は、海藻類の季節的な消長に同調していた（図-1.3.6）。葉上動物の優占種は、節足動物門端脚目ワレカラ亜目およびヨコエビ亜目で全現存量の 75%以上を占めた（図-1.3.7）。この結果は、瀬戸内海水域の岩礁性のホンダワラ類葉上動物でみられた傾向（吉川，1978）と類似していた。これらの端脚目ワレカラ亜目およびヨコエビ亜目は、マダイやヒラメなどの多くの水産有用魚種の稚魚期の餌生物として価値が高いことから（石田ほか，1977；水産庁，1983），人工魚礁に着生したホンダワラ類などの海藻類は、餌料性の高い端脚目などを増加させる機能を有し、魚類に好適な餌料環境を創出していることが示唆された。

付着動物の優占種は貝殻基質とコンクリート基質とも節足動物門完脚目フジツボ科であった。付着動物における出現分類群数および主要分類別の湿重量は、基質別では貝殻基質がコンクリート基質よりも多い傾向がみられた（図-1.3.9）。このことは、貝殻基質とコンクリート基質を用いた既往の文献においても、貝殻基質などの複雑な構造は付着動物にとって有効とされている（田中，1998；吉田ら，2001；野田ら，2002）。したがって、貝殻などの集積構造による空間を有している基質は、空間の形成に伴って表面積も増加することから平面形状の基質に比べより多くの固着動物が付着できる。これが、付着動物の生息に適した環境の拡大をもたらすことになり、その現存量を増加させたものと推察される。このことから、貝殻などによる集積構造の基質を人工魚礁に装着することは、蛸集する魚介類の餌料も増殖させることに有効であると考えられる。

底生動物の分布は、粒度組成や有機物の有無により左右されることが知られている（日本海洋学会，1986）。内湾性の砂質底には甲殻類が多く、内湾性の砂泥質底には多毛綱が優占する（新崎ら，1976）。今回の研究では、人工魚礁の設置により、人工魚礁および周辺の海域において底質がシルト質から砂質底へと変化していることが確認された（図-1.3.2，および図-1.3.3）。底生動物の生活様式による区分別の分布状況をみると、主に底質中に生息する A 群の平均湿重量は、魚礁区 0m が魚礁区他の調査点および対照区よりも明らかに多かった（図-1.3.12）。このことから、対照区が人工魚礁設置前の底質と仮定すると人

人工魚礁直近および周辺の底質は、底生動物の生息に適した性状へと変化したことがうかがえた。主に人工魚礁に固着・潜入し、底質中の生息は稀である B 群の平均湿重量は、魚礁区 0m が他の魚礁区および対照区に比べて極端に多い傾向がみられた。また、葉上動物と共通して出現する節足動物門端脚目および十脚目は魚礁区 0m で多く分布していた（表-1.3.6）。このように、人工魚礁で増殖した葉上動物や付着動物が人工魚礁から剥離、落下、あるいは移動して人工魚礁および周辺の海底に拡散し、底生動物相を多様化していると推察された。

マコガレイ稚魚の蛸集機能 人工魚礁周辺には、マコガレイ稚魚が 3 月上旬に出現し始め、生息密度は 4 月上旬から中旬にかけてピークになり、4 月下旬には減少した（図-1.3.13）。その間、平均全長で約 2.8 倍、平均体重で約 21 倍の成長が確認された（図-1.3.15）。同海域において、2001 年 5 月から 2002 年 4 月に実施された桁網による調査結果では、4 月には全調査点でマコガレイ稚魚が優占したが、5 月と 6 月では僅かな出現であったことから（岡山県，2002）、本海域におけるマコガレイ稚魚の一般的な出現を表しているものと考えられる。また、マコガレイ稚魚の人工魚礁近傍での水平分布は、基点 0~4m までの範囲で極めて高く、人工魚礁から離れるにしたがって低下した（図-1.3.13）。従って、本海域では 3 月から 4 月にかけてマコガレイ稚魚が着底し成長しており、その一部が人工魚礁周辺に高密度で分布していると推察された。

マコガレイの稚魚期の生態は日本海の舞鶴湾では、湾中央部の水深 15m 前後の泥底に着底し、その後、湾奥の波打ち際に移動して稚魚期を過ごす（南，1981）。周防灘では体長 9mm で 2 月頃から 4 月にかけて水深 10m 以浅の岸近くに着底し、成長に伴い沖合に移動する（東海ら，1989）。播磨灘北西部では 2 月中旬から 4 月上旬に全長 10~20mm で干潟に着底し、7 月以降 60~70mm 以上に成長したものから沖合に移動する（香川県，1975）としており、本調査結果の魚礁区と対照区におけるマコガレイの出現状況も同様の結果を示していた。

マコガレイ稚魚の餌料供給による増殖機能 マコガレイ稚魚に対する人工魚礁の餌場機能を検討するため、3~4 月に人工魚礁近傍に蛸集したマコガレイ稚魚を採捕し、消化管内容物の分析を行うとともに、マコガレイ稚魚とその餌生物に関連する生物群の安定同位体比の分析を行った。

マコガレイ稚魚は、魚礁区では、2012 年 3 月 8 日に採捕した平均全長 16.1mm と 2009 年 4 月 7 日と 2012 年 4 月 16 日に採捕した平均全長 31.9mm の大小の I と II 群、対照区では、2012 年 3 月 8 日に採捕した平均全長 14.7mm、2009 年 4 月 7 日と 2012 年 4 月 16 日に採捕した平均全長 21.0mm および 2012 年 4 月 16 日に採捕した 32.3mm の大小の III 群、IV 群、V 群に区別することができた（表-1.3.7, 8, 図-1.3.16）。

マコガレイ稚魚の消化管内容物では、平均全長15mm前後（魚礁区のⅠ群，対照区のⅢ群）ではハルパクチクス目やその他かいあし類で占められ，平均全長21.0mm（対照区のⅣ群）では，ハルパクチクス目が主体ではあるが多毛綱やヨコエビ亜目も捕食していた。そして，平均全長30mm以上（魚礁区のⅡ群，対照区のⅤ群）になるとヨコエビ亜目や多毛綱が主体となった（表-1.3.9）。

次に，安定同位体比の分析からマコガレイ稚魚の $\delta^{13}\text{C}$ 値は，成長とともに上昇する傾向がみられ，より $\delta^{13}\text{C}$ 値の高い餌生物に移行するという傾向を示した（表-1.3.10，図-1.3.17）。

$\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の濃縮係数（ S ）をそれぞれ1.0‰と3.4‰とすると，マコガレイ稚魚の食性は，平均全長15mm前後ではハルパクチクス目などの底生かいあし類を主体とする時期，平均全長21.0mmは，かいあし類から小型甲殻類や多毛綱へと食性を移行させる時期，そして，平均全長30mm以上になるとヨコエビ亜目，多毛綱を主体とする時期に対応することが消化管内容物の検索とともに安定同位体比分析の結果でも裏付けられた（表-1.3.9，図-1.3.18）。

このように，遊泳力が十分でない平均全長15mm前後のマコガレイ稚魚が泥底面に高密度で分布し，近底層中にも出現するとされるハルパクチクス目などのかいあし類をほぼ専食していることは，浮遊性の餌から底生性の餌への転換を円滑に行うことに貢献している（中神ら，2000）。また，当該域のSOMの $\delta^{13}\text{C}$ は，-22‰程度の値を示し，POMの $\delta^{13}\text{C}$ （-20～-21‰）より小さな値を示していた。これは陸上由来のデトライタス（ C_3 陸上高等植物の遺体などの $\delta^{13}\text{C}$ は-27‰；和田，1986）が混在し，ハルパクチクス目はこのようなSOMを餌としていることからヨコエビ亜目や多毛綱より低い $\delta^{13}\text{C}$ を示したと考えられた（表-1.3.12）。

人工魚礁の設置で新たに創出された空間（魚礁区）では，平均全長30mm以上のマコガレイ稚魚は，底生動物に加え設置された人工魚礁の天端部の海藻上に生息する葉上動物や付着動物を餌として利用していた（表-1.3.13）。このような生態系内における複数のエネルギー流路の存在は，一つ食物連鎖上の消費者が減少しても，残った連鎖上の消費者に切り替えられることになり，餌の選択性の多様化はマコガレイ稚魚個体群の安定的な維持につながると考えられる。さらに，基礎生産者としてPOMとMPBの二重構造による下支えは，マコガレイ稚魚の餌生物の安定供給につながると考えられた（図-1.3.18，表-1.3.14，15）。これらのことからマコガレイ稚魚は効率的よく餌生物を利用するために人工魚礁のごく近傍に高密度で蟄集していたものと推察され，人工魚礁はマコガレイ稚魚にとって餌場として増殖機能を有していることが示唆された。

本研究の結果，マコガレイ稚魚は3月から4月下旬まで人工魚礁のごく近傍に蟄集し，その間，成長していることが確認された。人工魚礁で増殖した葉上動物や付着動物は，人工魚礁から剥離，落下あるいは移動して底生動物を増加させ

っていると推察された。したがって、マコガレイ稚魚はこれらの餌生物を効率よく利用するために人工魚礁周辺に蛸集しているものと推察された。

第2章 マアジの蛸集・滞留機能と産卵場としての増殖機能

1. はじめに

マアジ *Trachurus japonicus* は、年間 20～30 万トンが漁獲される水産上の重要種で（金治ら，2007），その約 50%が対馬暖流域で漁獲されている（塚本，2007）。新潟県においては，定置網や人工魚礁などで操業される刺網および釣りによって，2000 年以降では年間約 3,000～8,000t が漁獲されている（日本海区水産研究所，2009）。本種は日本各地，東シナ海，および朝鮮半島の沿岸から沖合域に広く分布する（西田，2004）。北海道を除く日本沿岸各地で産卵し，主産卵場は九州北部から東シナ海南部にある（落合ら，1998；金治ら，2007）。日本海で漁獲されるマアジは，日本海西部から東シナ海南部で生まれた群が主群をなし，対馬暖流系群に属している（志村，2003；金治ら，2007）。対馬暖流系群のマアジは，仔稚魚期にはかいあし類，オキアミ類，端脚目およびカタクチイワシ仔魚を，未成魚・成魚期にはオキアミ類やカタクチイワシを主に摂餌する（鈴木，1965）。日本海西部の産卵期は，6～7 月にあることが知られている（落合ら，1998）。

新潟県佐渡島沿岸では，マアジは人工魚礁の主要な蛸集魚種であることが確かめられている（伊藤ら，2007）。柿元（1971），および伊藤ら（2007）は人工魚礁とその周辺で魚群探知機やステレオカメラを用いた定点撮影を行い，マアジは昼間には中・底層で群れを形成するが，夜間には表・中層に浮上・分散することを推定した。また，昼間の人工魚礁での潜水による目視観察で，ほぼ同じ全長のマアジが 2 週間から 1 ヶ月程度，連続的に出現することを推定した（伊藤ら，2007）。しかし，これらの報告はいずれもデータ数が少なく断片的であり，人工魚礁周辺へ蛸集するマアジの定量的な解析には至っていない。さらに，蛸集したマアジと人工魚礁周辺で生産される動物プランクトンなどの餌生物との関係や蛸集個体の成熟の状況など，人工魚礁が有すると考えられる増殖機能については検討されていない。

そこで，本研究は新潟県佐渡島沿岸に設置された人工魚礁を対象に，漁獲調査を行い，計量魚群探知機を用いてマアジの人工魚礁での分布や蛸集量を定量的に把握した。次に，超音波バイオテレメトリーを用いて，人工魚礁およびその周辺での行動を調査した。そして，両者の結果に基づいて，人工魚礁が有するマアジの蛸集・滞留機能を検討した。さらに，人工魚礁へ蛸集したマアジの消化管内容物，および人工魚礁のごく近傍に出現した餌生物と考えられる動物群との捕食-非捕食の関係やマアジの成熟状況を調べ，人工魚礁が有するマアジの産卵場としての増殖機能を検討した。

2. 方法

2.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺環境

本研究で調査対象とした人工魚礁（以下、対象魚礁）は、2001年5月に新潟県佐渡島羽茂地先海域の沖合3km、水深45m（37° 47.51' N, 138° 18.58' E）地点に、設置されたものである（図-2.2.1, および図-2.2.2）。対象魚礁は鋼製の高層型の人工魚礁であり、その大きさは縦13m×横13m×高さ21m（2,100 m^3 ）である。対象魚礁周辺の海底は平坦で、底質は対象魚礁の岸側では岩盤が露出し、沖側では砂質底に天然礁が点在する。

対象魚礁の水深28m地点に自記式水温計（Tidbit v2, Onset Computer 社製）を設置して（図-2.2.3）、2008年6月1日から8月6日まで1時間間隔で水温を測定した。また、STD（ASTD687, アレック電子社製）を用いて、2008年6月2日から8月5日まで約10日毎に、対象魚礁のごく近傍の海面直下から水深45mの海底面まで、1m毎に水温・塩分を測定した。流向・流速は、対象魚礁からほぼ南西へ20m離れた海底面に超音波式流速計（ワークホース ADCP, Teledyne RD Instruments 社製）を設置し（図-2.2.4）、2008年6月1日から8月7日まで20分間隔で測定した。解析に供した水深層は5m, 10m, 20m, 30m, および40mとした。

2.2 マアジの蜻集状況

2.2.1 全長組成

2008年6月2日から8月6日まで、対象魚礁とそのごく近傍で、釣りおよび刺網（網糸直径0.3mm, 目合60.6mm, 深さ方向の目数80目, 長さ75.8mを5反）によって、マアジを採捕した。この期間に、釣りについては11回、刺網については8回行った。釣りは昼間に行った。刺網は夕方に投網、翌朝に揚網した。466個体（釣り352個体, 刺網114個体）の全長（mm）, 標準体長（mm）（以下, 体長）, および体重（g）を計測した。

2.2.2 蜻集量の推定

計量魚群探知機（以下、計量魚探）（EY-500, SIMRAD 社製；周波数70kHz）を用いて、2008年7月8日から7月9日の4回〔夜間（19:11, 20:24～21:35, および3:13）, 昼間（08:44～09:20）〕, 対象魚礁の周辺海域を航走し、エコーグラムを記録した。対象魚礁を中心に東西かつ南北方向の80m内を探索海域とし、そこに間隔20mで10測線を設定した（図-2.2.5）。記録されたエコーグラムのうち、鈴木ら（1984）に従い、-50dB以上をマアジと判断した。このエコーグラムに基づいて、各測線における海面下3mから水深45mまでの1 m^2 当たりの後方散乱係数（ s_a ）を求めた。 s_a の解析ソフトには、Echoview 3.50（Sonardata 社

製)を用いた。夜間(20:24~21:35)と昼間(08:44~09:20)について、それぞれの区画(20m×20m=400 m²)毎の平均 s_a を求めた。ここで平均 s_a は、区画を構成する4測線の s_a の平均値とした。なお、航走前の7月8日の18:00および航走終了後の9日13:00に、潜水目視によって、マアジの魚群が対象魚礁およびそのごく近傍に多数分布していることを確認した。

次に、(1)式(古澤, 1990)により、マアジのターゲットストレングス(-38.38dB)を求めた。

$$TS=20\log BL-66 \dots\dots\dots (1)$$

TS : ターゲットストレングス (dB), BL : 体長 (cm)

ここで、体長は前述の漁獲調査のうち、7月9日の刺網によって採捕されたマアジの平均体長240mm ($n=13$ 個体)とした。

以上の平均 s_a と TS を(2)式に代入し、区画毎のマアジの個体数 N を推定した。

$$N = \text{平均 } s_a / 10^{TS/10} \times A \dots\dots\dots (2)$$

N : 個体数, A : 区画面積 400 m²

また、個体数 N にマアジの平均体重203.8 g ($n=13$ 個体)を乗じて、区画毎の重量 B を推定した。

本章では個体数 N と重量 B の両者を示す場合には「蛸集量」、個体数 N のみの場合には「蛸集個体数」、重量 B のみの場合には「蛸集重量」と表記した。蛸集量推定時の夜間と昼間の流向と流速は、それぞれの時間帯に含まれるデータの平均値とした。

2.2.3 個体の行動様式

超音波バイオテレメトリー(以下、発信機)(V9P-1H, VEMCO 社製; 直径 9mm, 長さ 40mm, 水中重量 2.7 g)を用いて、2008年6月11日から7月7日までに7回(1回当たり1個体)、マアジの行動を追跡した(表-2.2.1)。供試魚は追跡開始当日に対象魚礁で、釣りにより採捕した。供試魚の全長範囲は290~360mm(体重223~420g)であった。追跡に用いた発信機は超音波の発信間隔が1秒で(カタログ値の電池寿命は約4日間)、水深は200mまで測定可能である。発信機の水중重量が体重比2.6%以上になると、魚類の行動に影響が生じるとされることから(柿元, 1984)、本研究ではそれ未満となる大型のマアジ(体重比が1.2~2.3%)を使用した。

発信機の取り付け方法は外部装着法とした(図-2.2.6)。予め陸上で発信機の

先端から約 5mm 手前の所に装着用の紐（直径約 1mm）を巻き付けた（図-2.2.7）。船上でその紐を、マアジの臀鰭軟条基底始部の前方に縫合針とハサミペアン止血鉗子直無鉤を用いて、縫いつけた（図-2.2.8）。装着後、船上の 1 トン水槽に 15 分程度収容し、出血や遊泳異常がないことを目視で確認した。その後、供試魚とほぼ同じ体長のマアジ 10～20 個体とともに対象魚礁直上の海面に放流した。事前に、この装着方法によって発信機の脱落や傷口の異常などが起こらないことを、陸上水槽（5m×2m×1m）で 7 日間飼育実験を行い確認した。

供試魚の追跡は、1 素子のハイドロフォンに指向性を持たせた追跡型受信機（VR100, VEMCO 社製；受信範囲 300m）を装備した漁船で行った（図-2.2.9）。ハイドロフォンは、漁船右舷の水深 1m に固定した。供試魚の遊泳水深は、受信機の内部メモリーに直接記録した。供試魚の水平位置は漁船の位置とし、1 秒毎に GPS（GPS map 76, GARMIN 社製）により記録した。海底水深は 15 分毎に魚群探知機（FCV-291, FURUNO 社製）によって記録した。遊泳水深と供試魚の水平位置の 15 分毎のデータを、海底水深のデータとともに GIS ソフト（Arc View, ESRI 社製）に入力し、行動を解析した。

さらに、2008 年の追跡結果をもとに設置型受信機（VR2, VEMCO 社製；受信範囲 200m）を、2009 年 6 月に対象魚礁および周辺の天然礁（対象魚礁を中心に約 7km 範囲内）に合計 8 基、スキューバ潜水により設置し（図-2.2.10, 図-2.2.11, 図-2.2.12）、6 月 5 日から 7 月 27 日の間に 6 個体（6 月 2 日 3 個体、6 月 6 日 1 個体、6 月 12 日 2 個体）に発信器を取り付け、マアジの対象魚礁周辺での出現状況を記録した（表-2.2.2）。用いた供試魚の全長範囲は 315～365mm であった。追跡に用いた発信器は前述と同機種を使用したが発信間隔を平均 90 秒に設定することにより受信期間（受信可能日数約 72 日）が延長可能となり、約 2 ヶ月後にスキューバ潜水により回収し、対象魚礁周辺での滞留期間の解析を行った。

本章では、夜間を 19:00 から翌日の 04:30、昼間を 04:31～18:59 と定めた。また、供試魚の位置が対象魚礁を中心に水平距離 80m の範囲内にある場合は「対象魚礁に蛸集した」、天然礁では海底から 10m の高さまでの範囲内にある場合は「天然礁に蛸集した」と定めた。

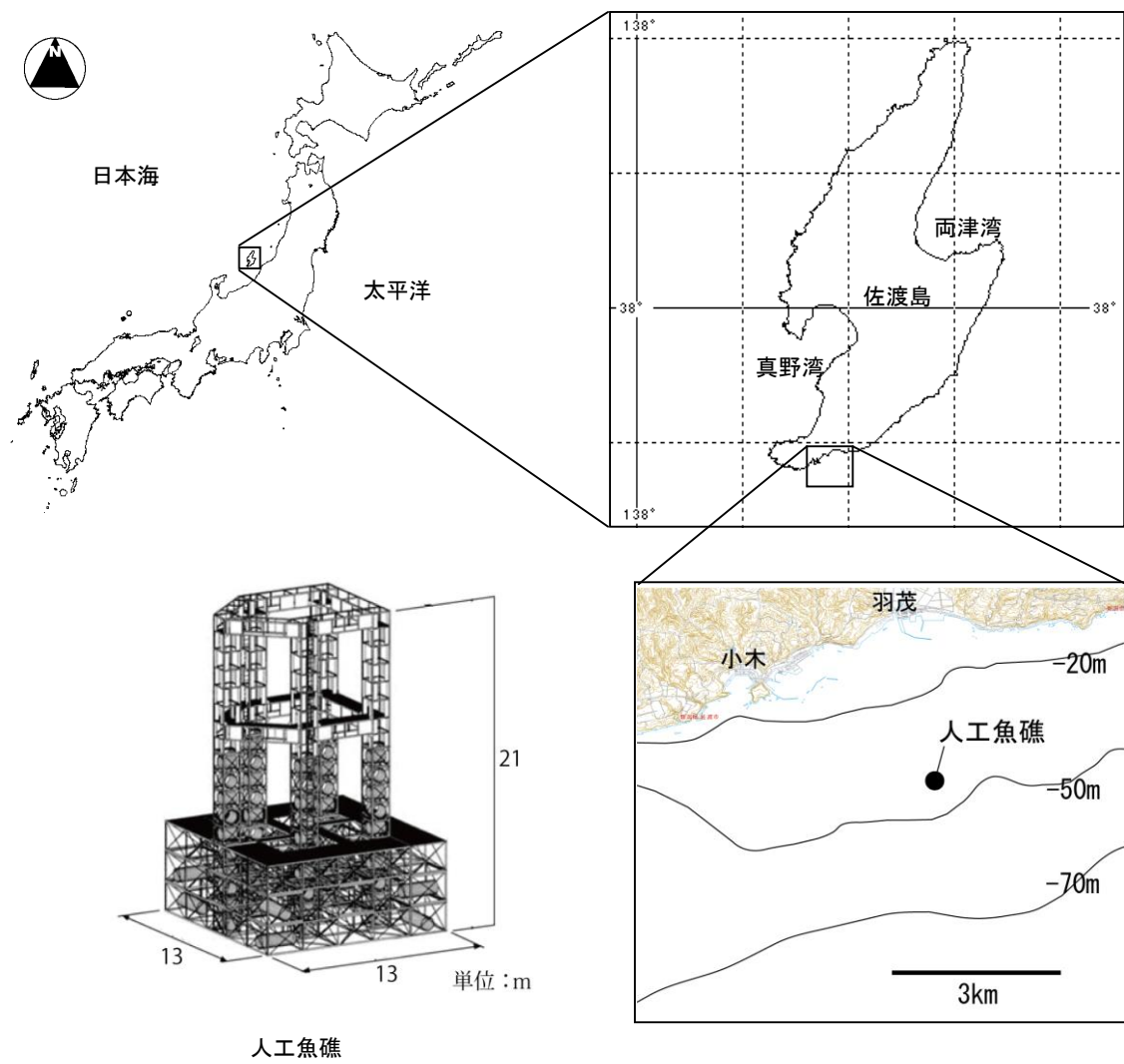


図-2.2.1 調査海域と調査対象の人工魚礁（新潟県佐渡島羽茂地先）

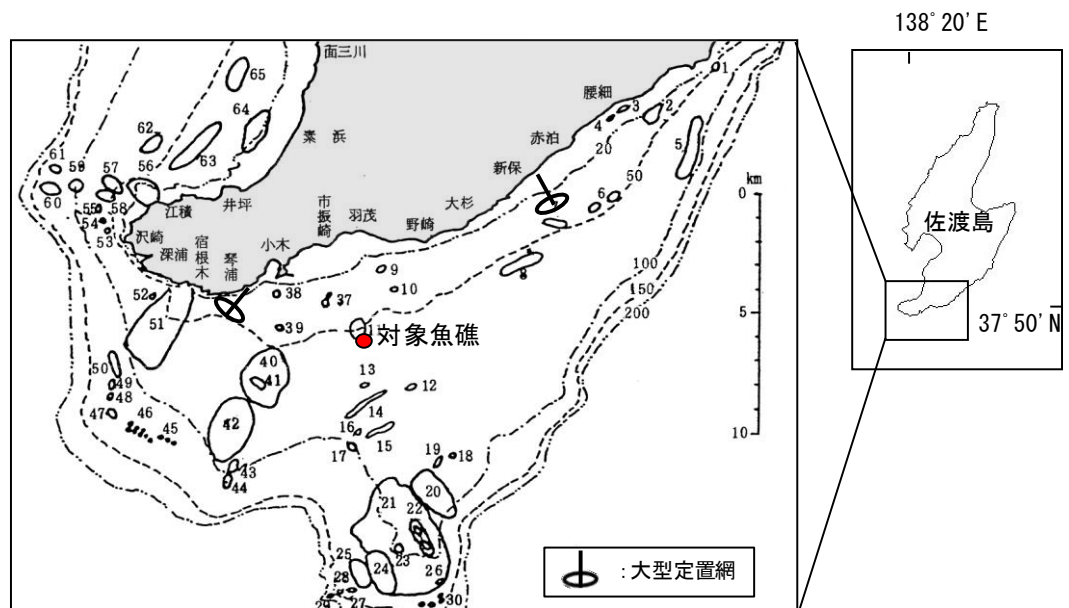


図-2.2.2 佐渡島南部海域における対象魚礁周囲の天然礁の位置
 注) 1. 数値は天然礁を示す。

2. 佐渡海域総合開発調査事業報告書（新潟県，1984）を改変。

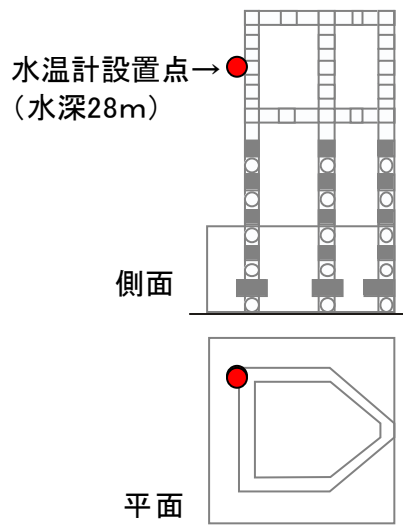


図-2. 2. 3 水温計の取り付け位置

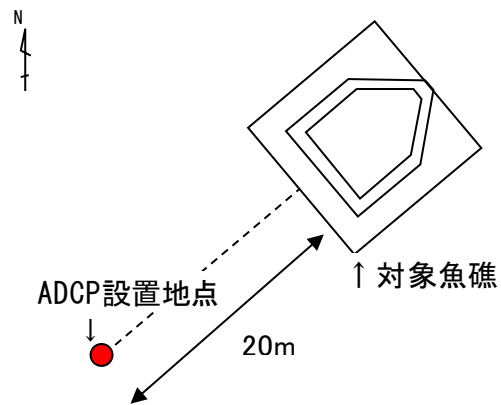


図-2. 2. 4 超音波式流速計の設置地点

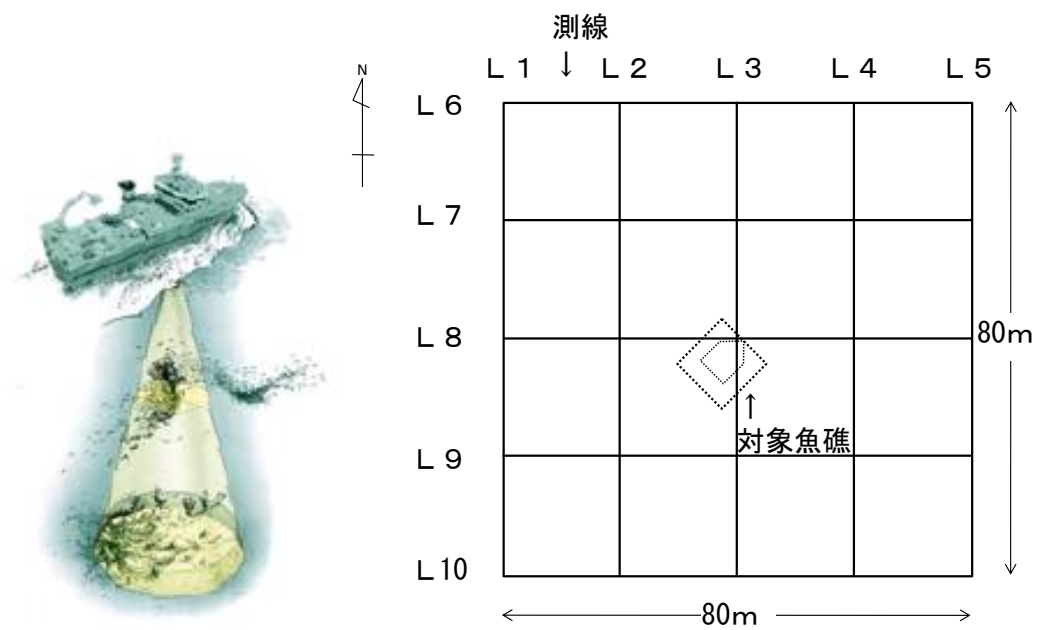


図-2. 2. 5 計量魚探による探査測線

表-2. 2. 1 供試魚と追跡型受信機による追跡状況（2008）

個体No.	全長(mm)	追跡日時				
1	345	6月11日	15:52	～	6月15日	4:30
2	339	6月16日	14:40	～	6月19日	15:30
		6月20日	9:15	～	6月22日	2:30
3	360	6月24日	11:30	～	6月26日	11:30
4	340	6月26日	12:55	～	6月28日	15:00
		6月29日	11:00	～	6月29日	18:00
5	356	6月30日	11:35	～	7月 1日	19:00
6	312	7月 2日	13:20	～	7月 3日	17:20
7	290	7月 5日	11:28	～	7月 7日	9:30

注) 個体No. 2, 4は追跡中に一時中断し, 再度追跡を行った。

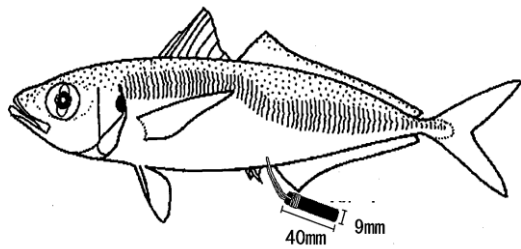


図-2.2.6 発信器の装着部位



図-2.2.7 発信機



図-2.2.8 発信機の装着状況



図-2.2.9 受信器



図-2. 2. 10 設置型受信機の設置位置



図-2. 2. 11 設置型受信機



図-2. 2. 12 設置型受信機の設置状況

表-2. 2. 2 供試魚と設置型受信機による追跡期期間（2009）

個体No.	全長(mm)	期間				
a	350	6月2日	17:04	～	6月20日	19:45
b	315	6月2日	17:00	～	6月26日	18:52
c	365	6月2日	17:00	～	7月4日	19:49
d	340	6月6日	16:35	～	6月19日	22:16
e	330	6月12日	17:18	～	6月26日	12:47
f	350	6月12日	17:21	～	7月16日	19:47

2.3 増殖機能

2.3.1 餌生物と食物網

2008年6月24日および7月9日に対象魚礁周辺で刺網により採捕されたマアジ（全長 221~331mm）5 個体の消化管内容物を分析した。マアジの消化管（胃および腸全体）を摘出し、含まれる内容物を 10%ホルマリンで固定後、分類群に同定し、それらの個体数および湿重量を計数、測定した。

マアジとその餌生物に関連する動物プランクトン、植物プランクトンの指標となる水中の懸濁態有機物（Particulate Organic Matter；以下、POM）、底生動物、付着動物、および底質の炭素・窒素安定同位体比を分析した（表-2.2.3）。マアジは、2008年6月8、9日、および28日に対象魚礁において釣りによって採捕された34個体を用いた。これらの筋肉組織（34検体）および毛細血管より採血した血漿（26検体）を冷凍保存（-20℃、以下の試料も同様）した。動物プランクトン、POM、付着動物、底生動物、および底質については、2008年6月9日に、対象魚礁あるいはそのごく周辺で採取した。動物プランクトンについては、丸特ネット（0.315mm メッシュ、離合社製）を水深 30mから海面まで鉛直曳きし、採集物を GF/F フィルターで濾過し、残渣を冷凍保存した。POM はバンブー採水器（A 型 6L、宮本理研工業社製）を用いて海面付近の海水を採取した。採水後、冷暗状態で分析室に搬入、直ちにプランクトンネット地（250 μ m メッシュ）で濾過して、動物プランクトンなどを除去した後、あらかじめ 450℃で3時間加熱処理をしたグラスファイバー濾紙（GF/F47mm フィルター、Whatman 社製）で減圧濾過を行ったものを冷凍保存した。

付着動物、底生動物、および底質についてはスキューバ潜水により採取した。これらの採取方法と分析対象は次の通りである。付着動物：対象魚礁の水深 28 mの部材表面の 30cm×30cm 程度を剥ぎ取り、1mm メッシュの木綿袋に収容し、多毛綱、短尾族、および端脚目の3分類群を選別後、冷凍保存した。底生動物：海底の底質を 30cm×30cm 程度採取し、1mm メッシュのふるいにかけて、大型の底生動物（メガロベントス）を取り除いて分取した多毛綱、長尾族、短尾族、異尾族、および端脚目の5分類群を冷凍保存した。底質：海底のごく表面の砂泥を 30cm×30cm 程度採取し、1mm メッシュのふるいで底生動物を取り除いたものを分取し、冷凍保存した。

以上の13試料を分析直前に解凍し、60℃で24時間乾燥処理し、粉末処理したものを乾燥重量で約1g分取した。なお、底生動物、付着動物および底質の試料については、解凍・乾燥後、6Nの塩酸を約1mL滴下し、脱炭酸処理を行い錫コンテナーに入れた。残りの試料についてはクロロフィル：メタノール（2:1）溶液に24時間浸し、20分間の遠心分離を2回繰り返して、脱脂処理を行い錫コンテナーに入れた。炭素・窒素安定同位体比は、元素分析計（EA1100、サーモ

クエスト社製)に質量分析計(MAT-252, フィニガンマット社製)を組み合わせたシステムによって求めた。

炭素・窒素安定同位体比は、捕食動物とその餌生物との関係を示唆する。海域では栄養段階が1つ上がると、窒素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$)は約3.4‰、炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)は約1‰上昇する(DeNiro and Epstein, 1978, 1981)。これらに基づいて、食物網を解析した。

2.3.2 成熟状況

対象魚礁で2009年6月2日から6月16日にかけて昼間に釣りによって採捕されたマアジ59個体を用いた。また、対象魚礁から西に5km離れた小木定置網と北東に10km離れた赤泊定置網で、2009年5月3日から8月6日にかけて早朝に漁獲された307個体を用いた(図-2.2.2)。これらの全長(mm)と体重(g)を測定した。その後、生殖腺を摘出し、性を判別した。雌については生殖腺重量(g)を測定し、(3)式により生殖腺指数(GSI)を算出した。マアジの成熟状況は、依田ら(2004)の対馬暖流系群のマアジ雌が成熟もしくは産卵期であると判断される GSI 値の指標[≥ 3 以上かつ TL (全長) $\geq 222\text{mm}$]に従った。

$$GSI = GW/BW \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 GW は生殖腺重量(g)、 BW は体重(g)である。

表-2. 2. 3 炭素・窒素安定同位体比分析に用いた試料

試料		分析部位	検体数
マアジ		筋肉組織	34
〃		血漿	26
動物プランクトン		全量	3
POM		全量	3
付着動物	多毛綱	全量	3
	短尾族	〃	4
	端脚目(ヨコエビ亜目)	〃	5
	端脚目(ワレカラ亜目)	〃	4
底生動物	多毛綱	全量	5
	長尾族	〃	5
	短尾族	〃	5
	異尾族	〃	5
	端脚目(ヨコエビ亜目)	〃	3
	端脚目(ワレカラ亜目)	〃	3
底質		全量	5

3. 結果

3.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺環境

対象魚礁における水深 28m の水温は、6 月上旬では 11～13℃、7 月上旬では 16～17℃、8 月上旬では 18～26℃ の範囲にあり、8 月 3 日以降で急激に上昇した（図-2.3.1）。水温の鉛直分布をみると（図-2.3.2 上）、どの時期も水深 20～30 m 付近に水温躍層が認められた。

塩分は調査の前日あるいは前々日に 40mm/日以上 の降雨があった 6 月 30 日から 7 月 18 日までの水深 20m 以浅を除き、33.7～34.5 の範囲であった（図-2.3.2 下）。水温躍層のある付近に塩分躍層が認められ、水深 20～30m 以浅ではそれ以深よりもやや低くなっていた。

流向は、西流あるいは西南西流が卓越した（図-2.3.3）。流速は水深の増加にしたがい遅くなる傾向がみられた。水深 5～20m では 19.9cm/s 以下の 2 階級で 90% 以上を占め、30.0cm/s 以上の流速も認められた。しかし、水深 30m および 40m では 0～9.9cm/s が 70% 以上と卓越し、30.0cm/s 以上は認められなかった。

3.2 マアジの蜻集状況

3.2.1 全長組成

釣りによって採捕されたマアジの全長範囲は 175～418mm であった（図-2.3.4 左）。全長のモードは 6 月 2～4 日では 301～325mm の階級にあったが、6 月 30 日～7 月 3 日と 16 日では 251～275mm、8 月 3～5 日では 176～200mm の階級にあった。刺網により採捕されたマアジの全長範囲は 173～360mm であった（図-2.3.4 右）。刺し網による全長のモードはいずれもほぼ同時期の釣りによるモードよりも大きく、6 月 24 日および 7 月 9～18 日では 276～300mm、8 月 5～6 日では 201～225mm にあった。

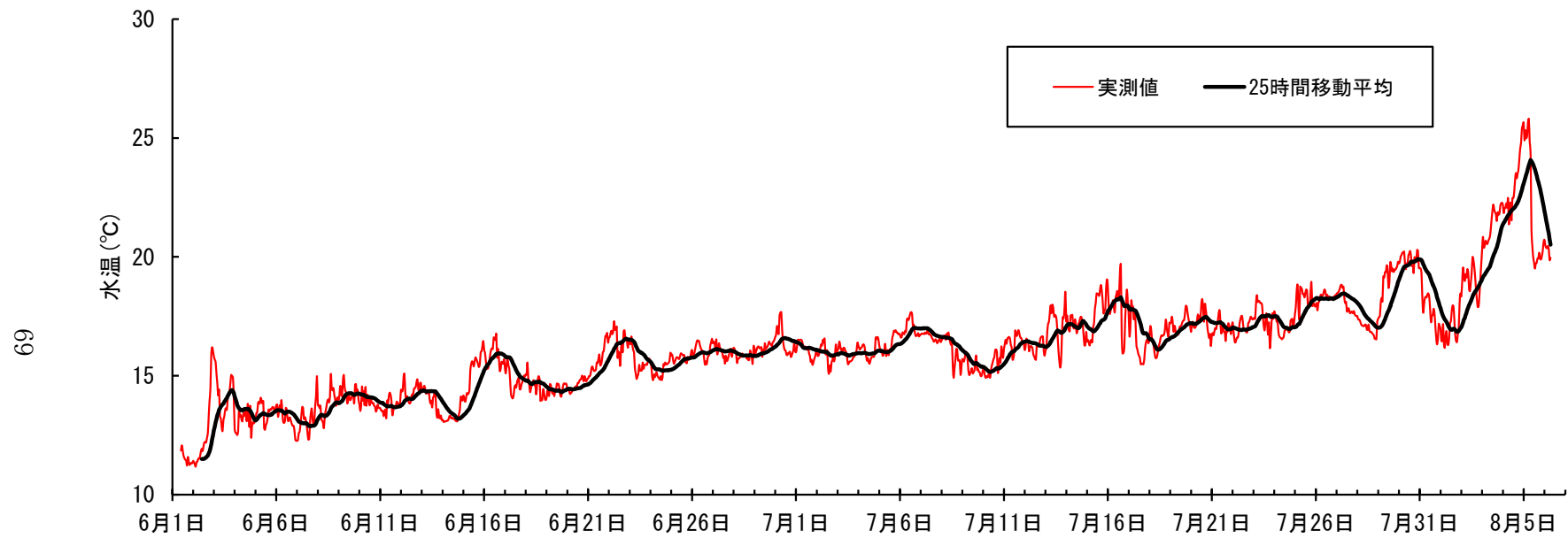


図-2.3.1 対象魚礁における水深 28m地点の水温

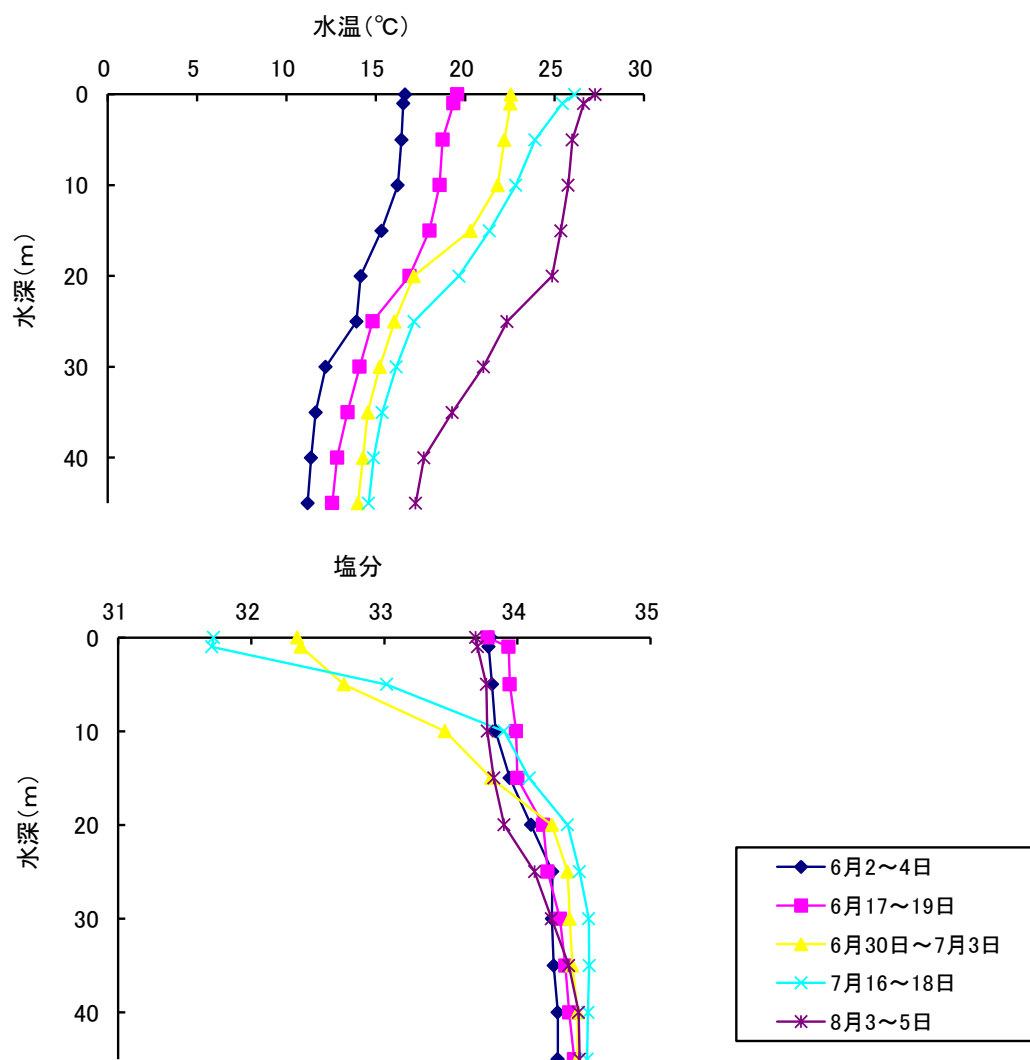


図-2.3.2 対象魚礁における水温・塩分の鉛直分布

注) それぞれの記号の位置は各調査期間の平均値を示す。

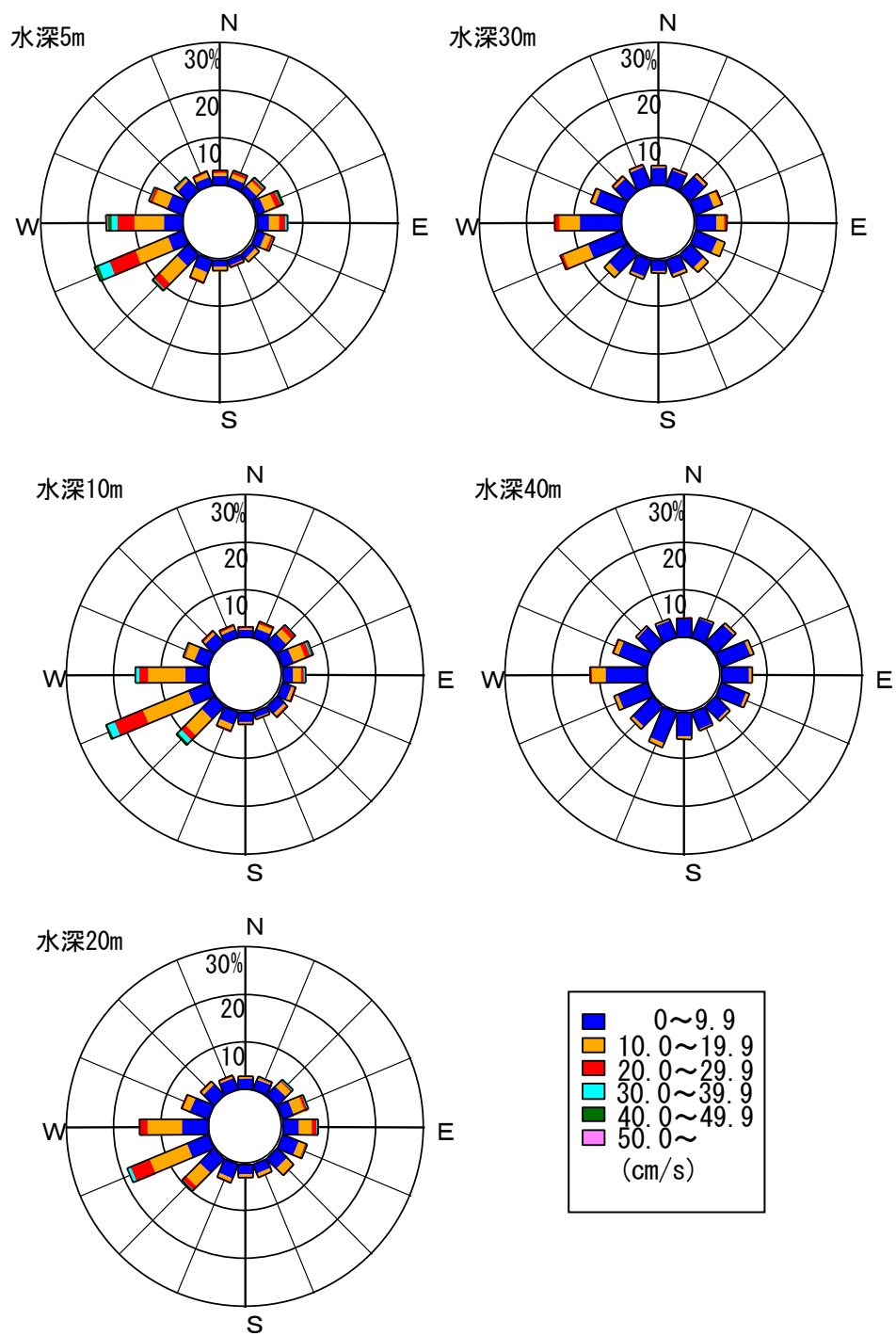


図-2.3.3 対象魚礁周辺における流向・流速の頻度分布

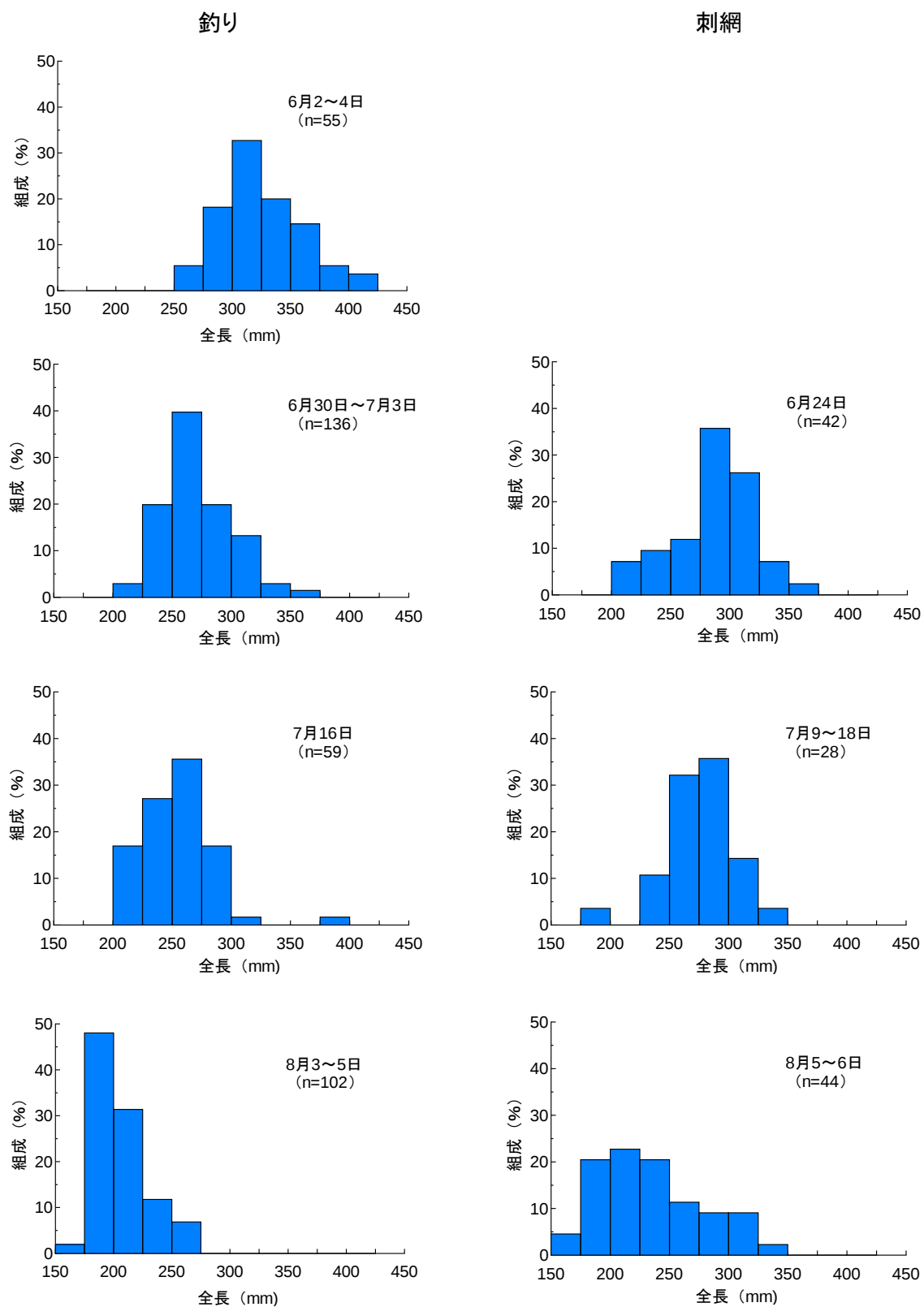


図-2.3.4 対象魚礁周辺におけるマアジの全長組成

3.2.2 蛸集量の推定

エコーグラム昼夜の変化 マアジのエコーグラムは、夜間の 19:11 では対象魚礁の北北西 20m 付近の水深 20~40m 層に認められた (図-2.3.5)。その後、エコーグラムは 21:24 と 03:13 ではどちらも対象魚礁上とその近傍にあり、水深は 21:24 では 10m 以浅、03:13 では 10~20m にあった。翌日の昼間の 09:13 では、エコーグラムは対象魚礁の東側にあり、水深は前日の 19:11 と同様に 20~40m にあった。

蛸集量の推定 対象魚礁におけるマアジの蛸集量を昼夜別に表-2.3.1 に示した。昼間 (08:44~09:20) の蛸集個体数と蛸集重量は 7,489 個体と 1,526kg であり、夜間 (20:24~21:35) の 7.1 倍 (1,057 個体と 215kg) に達した。蛸集個体数を区画毎 (400 m²) にみると (図-2.3.6), 昼間では対象魚礁の東~東北東側で 1,001 個体/400 m² 以上に達したのに対し、西側では 1~100 個体/400 m² 以下で、最も西側の区画ではいずれも 5 個体/400 m² 以下と非常に低密度であった (χ^2 独立性検定, $P < 0.001$)。昼間の平均流向・流速は西南西 23.3cm/s で、蛸集個体数が多かった区画は潮上側に位置した。一方、夜間はどの区画もほぼ一様に少なく、1 区画当たり 48~103 個体/400 m² で、区画間での有意差は認められなかった (χ^2 独立性検定, $P > 0.05$)。夜間の流向・流速は南西 5.7cm/s であった。

3.2.3 個体の行動様式

発信機によるマアジ供試魚 7 個体のそれぞれの追跡日数は 2~7 日で、延べ 444 時間に達した。それぞれの供試魚の追跡状況の概要を表-2.3.2 に示した。

昼夜の水平的な行動変化 各供試魚の水平移動経路 (15 分毎の遊泳場所) を図-2.3.7 に、対象魚礁および天然礁への出現頻度を図-2.3.8 に示した。供試魚は、放流当日の昼間には対象魚礁 (個体 No. 1~5) や、対象魚礁から北西に 500 m 離れた天然礁 (個体 No. 6, 7) に蛸集した。夜間になると、すべての供試魚は蛸集していた対象魚礁や天然礁から離脱し、周辺海域で遊泳した。そして、翌日の昼間には再び対象魚礁 (例, 個体 No. 2 と 4) あるいは天然礁に蛸集した。特に、個体 No. 2 は昼間の 7 日間 (追跡中断を含む) 対象魚礁周辺に滞留した。

礁から離脱、礁へ蛸集する時間 供試魚が夜間に対象魚礁および天然礁 (以下、礁とした場合、対象魚礁と天然礁を示す) から離脱する時間帯は 18:45~21:15 (n=19) で、日没 (追跡期間では 19:09~19:12) の約 30 分前から日没後約 2 時間の間であった。一方、再び礁に蛸集する時間帯は 02:30~04:30 (n=19)

で、日の出（追跡期間では 04:23～04:30）の約 2 時間前から、ほぼ日の出までの間であった。

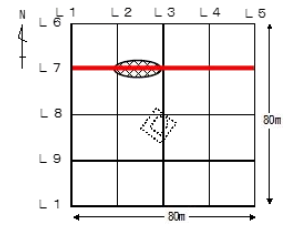
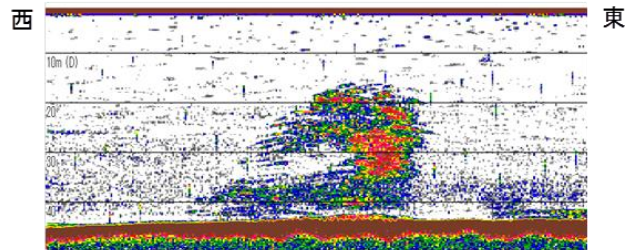
礁への滞留時間 各供試魚の一日当たりの礁での平均滞留時間は 12 時間 00 分から 17 時間 35 分であった（ $n=5$ ）。供試魚全体で見ると、礁での出現率は昼間では延べ追跡時間（266 時間）の 95.3%（=対象魚礁の 49.3%+天然礁の 46.0%）、夜間では延べ追跡時間（178 時間）の 38.3%（=対象魚礁の 23.4%+天然礁の 14.9%）であり、両者は有意に異なっていた（ χ^2 検定, $P<0.001$ ）（図-2.3.9）。

夜間の移動範囲 供試魚が夜間に対象魚礁を起点としてどこまで移動するのかを把握するため、最遠地点までの移動距離と方向を図-2.3.10 に示した。最遠地点までの直線距離は平均 1.7km（0.7～2.6km, $n=16$ ）であった。対象魚礁に 7 日間繰り返して出現した個体 No. 2 の直線距離は平均 1.0km（0.7～1.4km, $n=4$ ）であった。また、対象魚礁から最遠地点の方向には規則性は認められなかった [V （修正版レーリー）検定, $P>0.05$]。

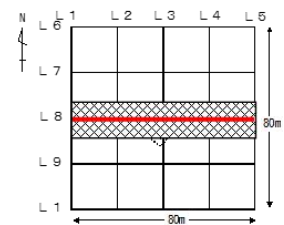
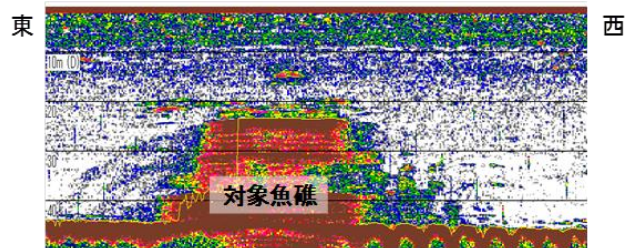
昼夜の鉛直的な行動変化 供試魚は海面近くから水深 70m の広い範囲に出現した（図-2.3.11）。多くは、昼間では海底から 30m 以内を遊泳し、夜間では主に水深 10m 以浅の表層を中心に、底層まで広く遊泳した。いずれの供試魚も水温・塩分躍層（水深 20～30m）の制約を受けることはなかった。遊泳水深の出現頻度を全個体でまとめ、昼夜別に図-2.3.12 に示した。ここで、昼間については、対象魚礁、天然礁、および礁以外の海域の 3 つに細分した。最も多く出現した水深帯は、昼間の対象魚礁では天端部周辺と天端部から約 5～10m の高さ、天然礁では海底面の礁直上（海底面から約 5～10m の高さ）、そして礁以外では海底面から約 10～20m の高さであった。一方、夜間には昼間より広い水深範囲に出現し、水深約 5～10m 層に最も多く出現した。それぞれの鉛直分布は水深によって有意に異なった（クラスカル・ウォリス検定法, $P<0.05$ ）

個体の滞留期間 設置型受信機で得られた供試魚 6 個体の対象魚礁周辺での受信日数（1 回の受信でも受信したものは 1 日とした。）は 15～33 日間で、延べ 135 日間、3,250 時間に達した。それぞれの供試魚の追跡状況の概要を表-2.3.3 に示した。各供試魚の対象魚礁周辺海域への平均滞留日数は 22 日間であり、全ての供試魚は対象魚礁に数日間滞留し、その後、対象魚礁の岸側や沖側の天然礁に出現し、再び対象魚礁に滞留しながら礁間の移動を繰り返した（図-2.3.13）。

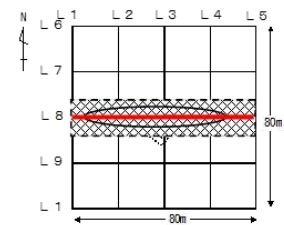
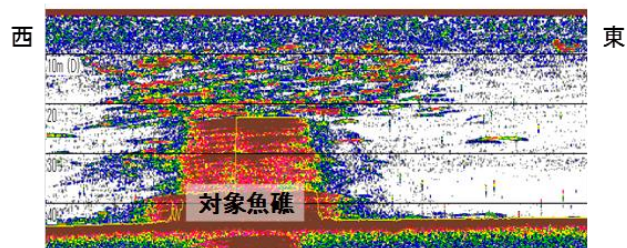
7月8日 夜間 (19:11), L7



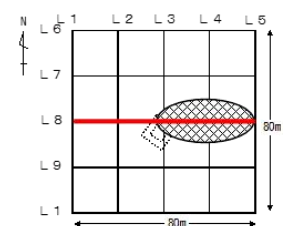
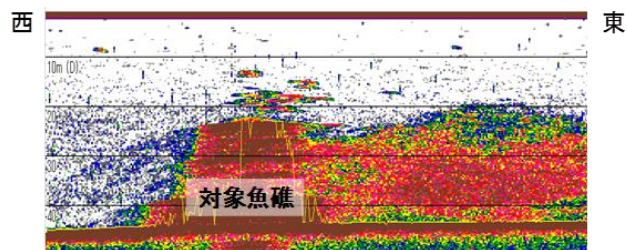
7月8日 夜間 (21:24), L8



7月9日 夜間 (3:13), L8



7月9日 昼間 (9:13), L8



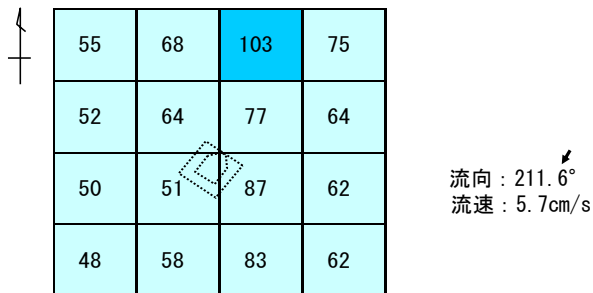
⊗ :マアジ □ :対象魚礁

図-2.3.5 マアジのエコーグラムとその位置

表-2.3.1 対象魚礁周辺におけるマアジの蛸集量

	蛸集個体数	蛸集重量(kg)
7月8日 夜間(20:24～21:35)	1,057	215
7月9日 昼間(08:44～ 09:20)	7,489	1,526

7月8日, 夜間 (20:24～21:35)



7月9日, 昼間 (08:44～09:20)

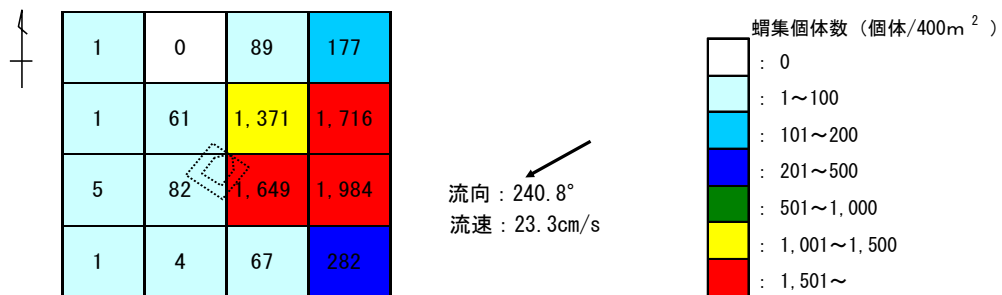


図-2.3.6 マアジの区画ごとの蛸集個体数と流向・流速

- 注) 1. 格子内の数字は1区画(20m×20m)の水柱におけるマアジの蛸集個体数を示す。
2. 図中の矢印は調査時間帯の平均の流向・流速を示す。

表-2.3.2 発信器による追跡状況の概要（2008）

個体No.	放流時刻	追跡時間	1日あたりの礁への平均滞留時間	行動の特徴
1	15:52	84時間38分	15時間45分	放流当日の昼間は対象魚礁に蛸集。夜間は礁を離脱・遊泳し、2日目以降の昼間は岸側の天然礁に蛸集
2	14:40	138時間05分	17時間35分	放流当日の昼間は対象魚礁に蛸集。夜間は礁を離脱・遊泳し、2日目以降の昼間は対象魚礁に蛸集
3	11:30	48時間00分	12時間00分	放流当日の昼間は対象魚礁に蛸集。夜間は礁を離脱・遊泳し、2日目以降の昼間は沖側および岸側の天然礁に蛸集
4	12:55	51時間35分	13時間45分	放流当日の昼間は対象魚礁に蛸集。夜間は礁を離脱・遊泳し、翌日以降の昼間は岸側の天然礁および対象魚礁に蛸集
5	11:35	48時間10分	—	No. 1と同様
6	13:20	28時間00分	—	放流直後から対象魚礁より500m離れた天然礁に蛸集し、夜間は礁を離脱・遊泳し、2日目以降の昼間は岸側の天然礁に蛸集
7	11:28	46時間02分	13時間30分	放流直後は一旦対象魚礁に蛸集するが、その後No6と同様に500m離れた天然礁に蛸集し、夜間は礁を離脱・遊泳し、2日目以降の昼間は岸側の天然礁に蛸集

注) 1.No. 2, 4は追跡中に一時中断し、再度追跡を行った。

2.No. 5, 6では、礁への滞在途中に調査を終了したことから、1日あたりの滞在時間は求めている。

3.礁とは、対象魚礁および天然礁を示す。

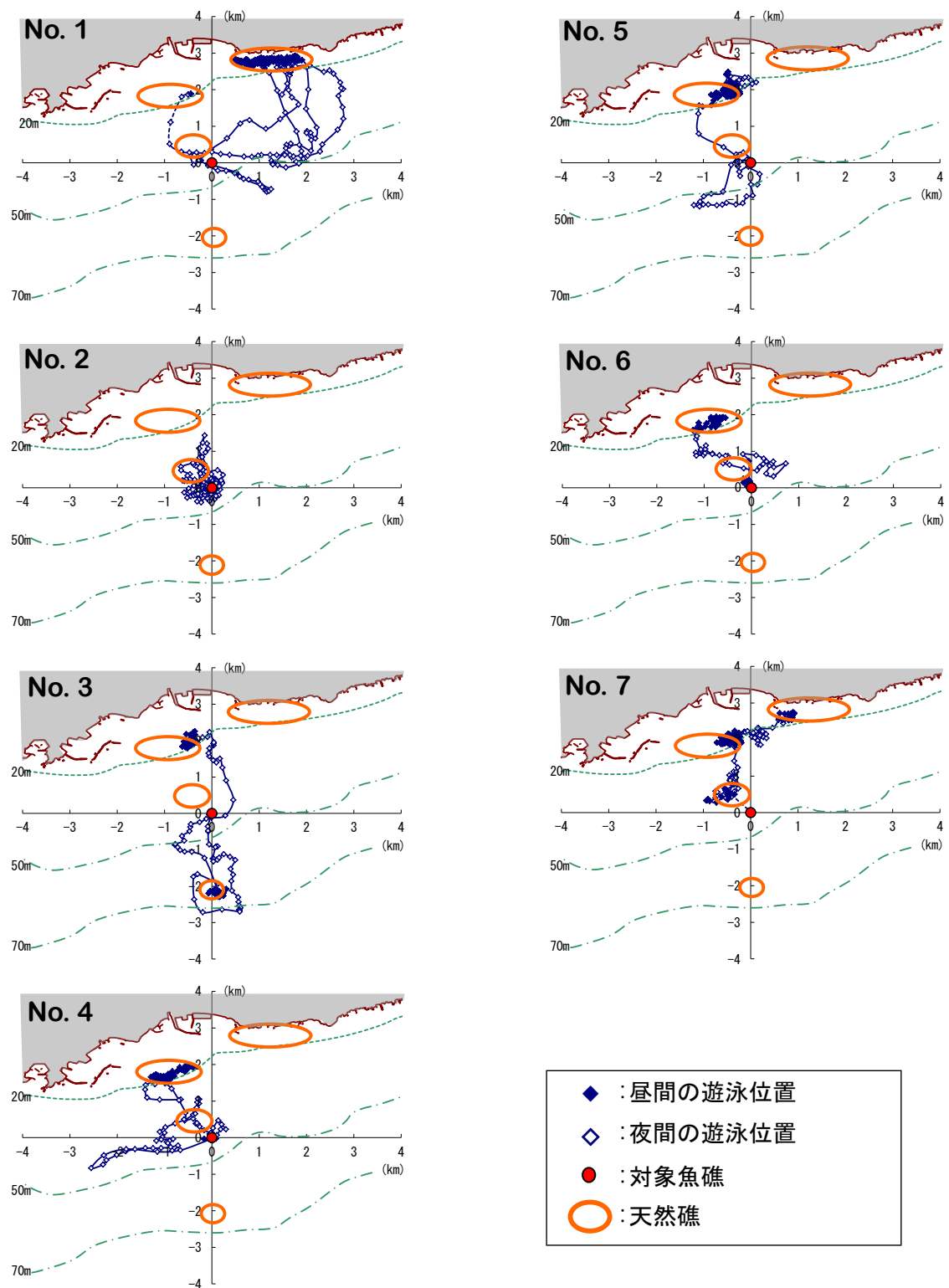


図-2.3.7 マアジの水平移動

- 注) 1. 縦軸は南北方向、横軸は東西方向を示す。
2. 各プロットはマアジの15分毎の遊泳場所を示す。
3. No. は個体番号を示す。

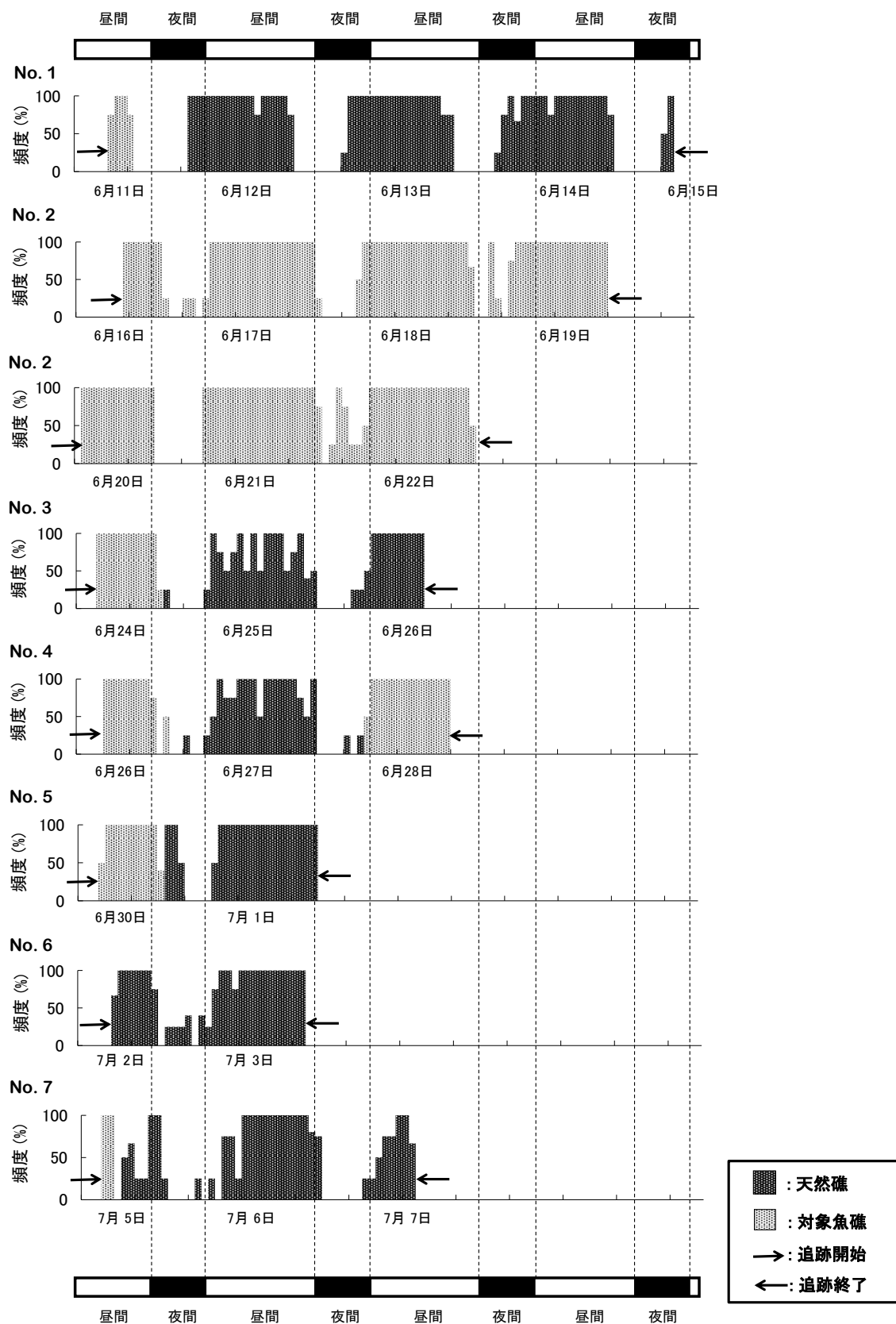


図-2.3.8 マアジの対象魚礁および天然礁への出現頻度（個体別）

注）No. は個体番号を示す。

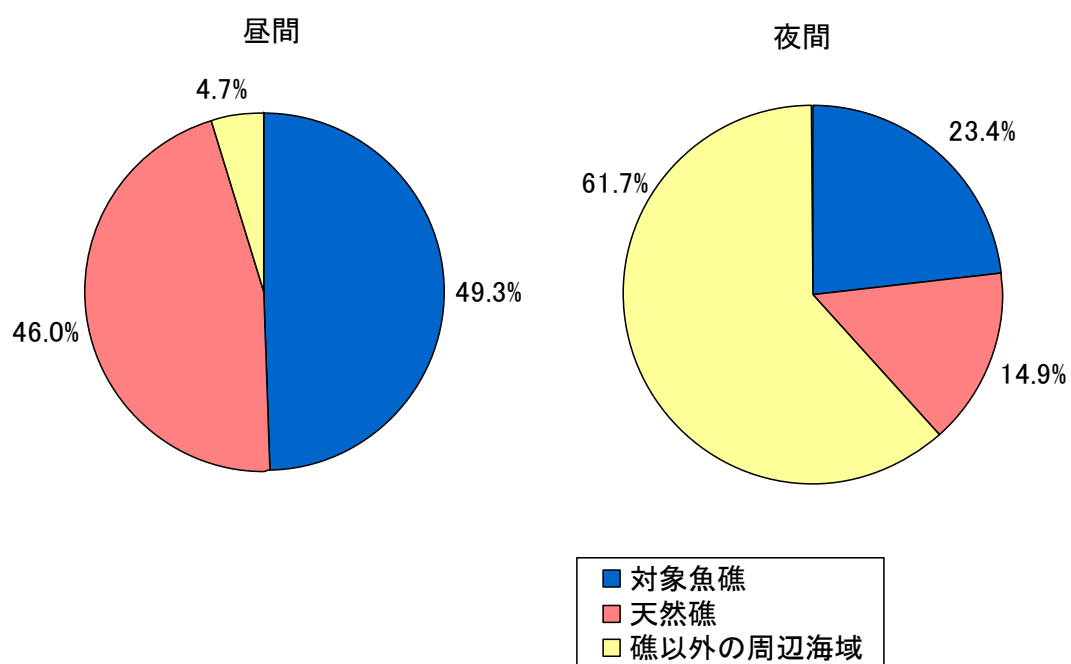


図-2.3.9 マアジの対象魚礁および天然礁への出現頻度（全個体・全期間）
 注）延べ追跡時間は昼間では266時間，夜間では178時間であった。

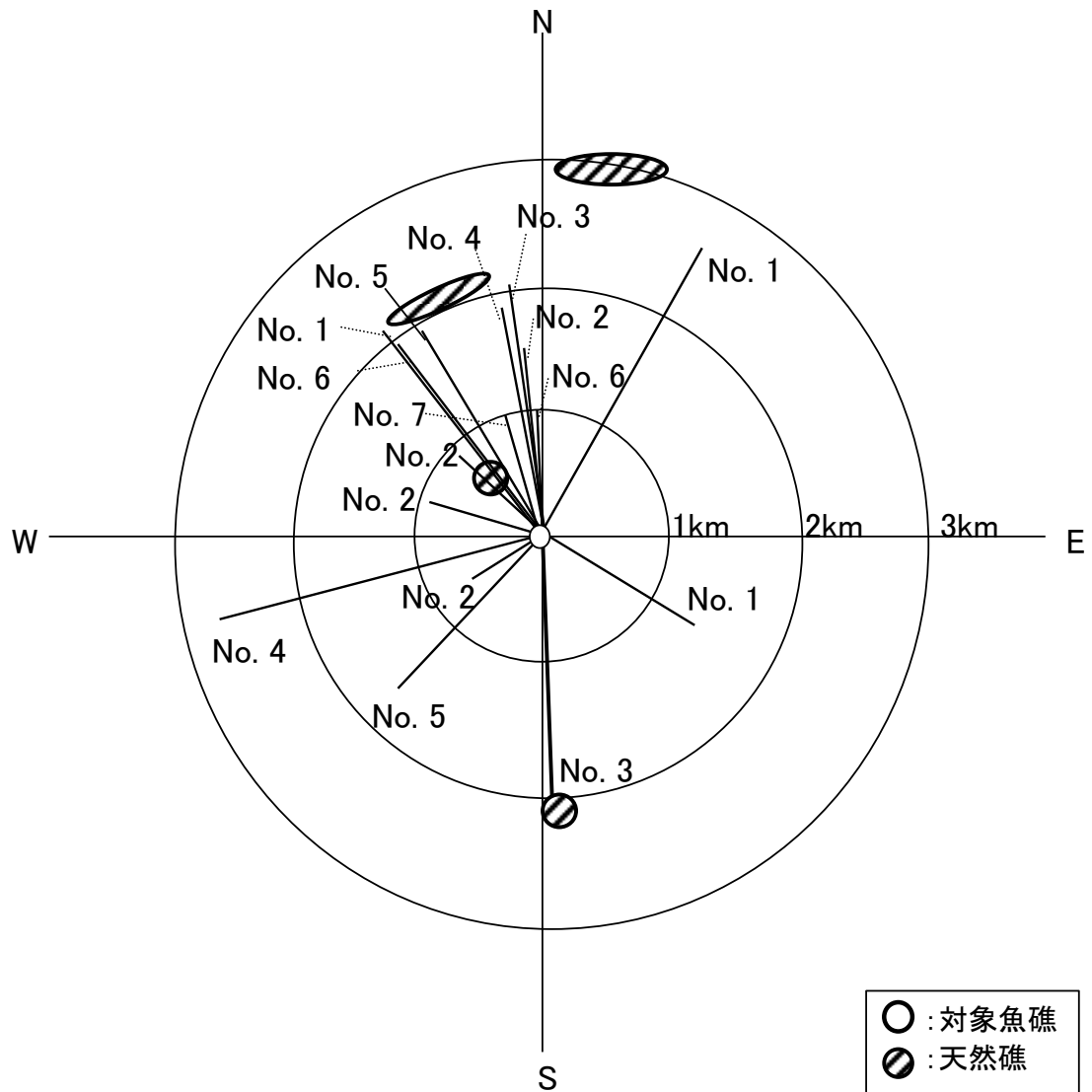


図-2.3.10 マアジが夜間に対象魚礁から移動した最遠地点までの距離と方向
 注) No. は個体番号を示す。

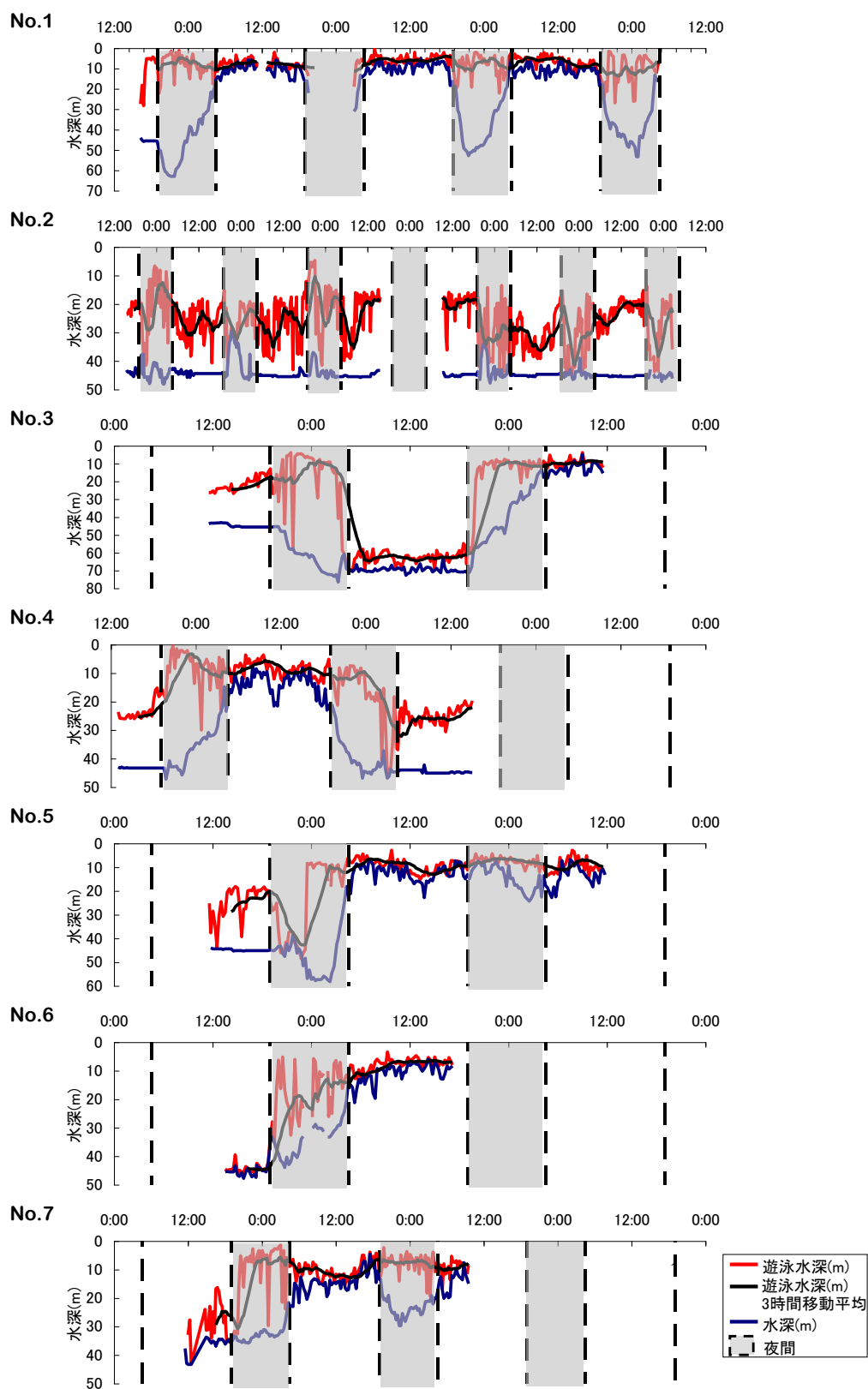


図-2.3.11 マアジの鉛直移動（遊泳水深）

注) 1. 各プロットはマアジの15分毎の遊泳水深を示す。
2. No. は個体番号を示す。

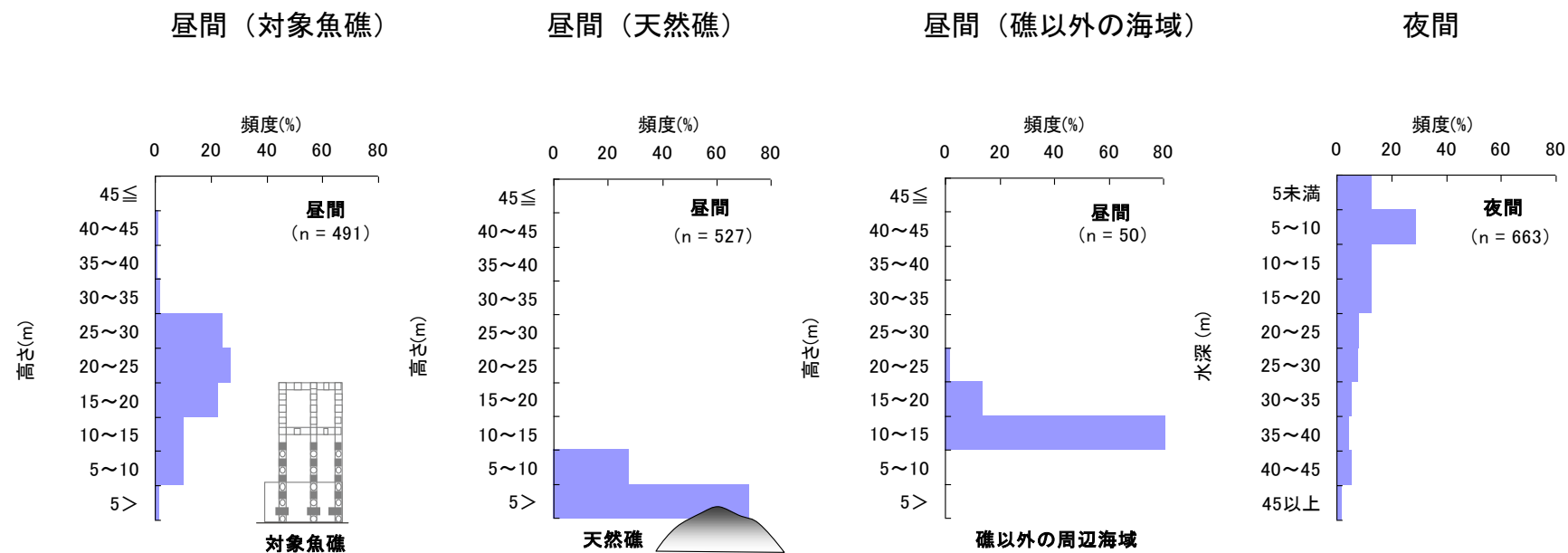


図-2.3.12 マアジの遊泳水深の出現頻度（全個体・全期間）

- 注) 1. 夜間では全データを用いて出現頻度を示したが、昼間では対象魚礁、天然礁および礁以外の周辺海域に細分した。
2. グラフの縦軸は、昼間では海底面からの高さを、夜間では水深を示す。

表-2.3.3 設置型受信機による追跡状況の概要（2009）

個体No.	放流日時	受信時間	行動の特徴
a	6月2日 17:04	434時間41分	放流当日は対象魚礁で確認。翌日以降約2週間羽茂沖30m、市振崎沖の地点間を移動した後、対象魚礁で3日間確認。その後、羽茂沖30m、市振崎沖で確認。
b	6月2日 17:00	577時間52分	放流当日は対象魚礁で確認。その後、対象魚礁および羽茂沖30m、羽茂沖50m、市振崎沖で、約3週間後には羽茂沖60m、三瀬沖で確認。
c	6月2日 17:00	770時間49分	放流日から3日後までは対象魚礁、羽茂沖30m、羽茂沖50mを移動し、その後は約3週間後まで市振崎沖に滞留し、その後、三瀬沖、市振崎沖で確認。
d	6月6日 16:35	317時間41分	放流当日は対象魚礁に滞留。翌日は三瀬沖に、5日後までは市振崎沖で確認。その後、羽茂沖30m、三瀬沖で確認され、10日から約1週間後には既存魚礁で確認。なお、約20日後には赤泊の定置網で漁獲。
e	6月12日 17:18	331時間29分	放流当日は対象魚礁に滞留。翌日は三瀬沖に、以降は対象魚礁、羽茂沖30m、市振崎沖、羽茂沖50mで確認。
f	6月12日 17:21	818時間26分	放流当日は対象魚礁南の羽茂沖50mと羽茂沖70mで確認。翌日は対象魚礁で確認。以降は対象魚礁、羽茂沖30m、市振崎沖、羽茂沖50m、羽茂沖70mで確認。

注) 受信時間は放流日時より起算して最後の受信時刻までの時間を示す。

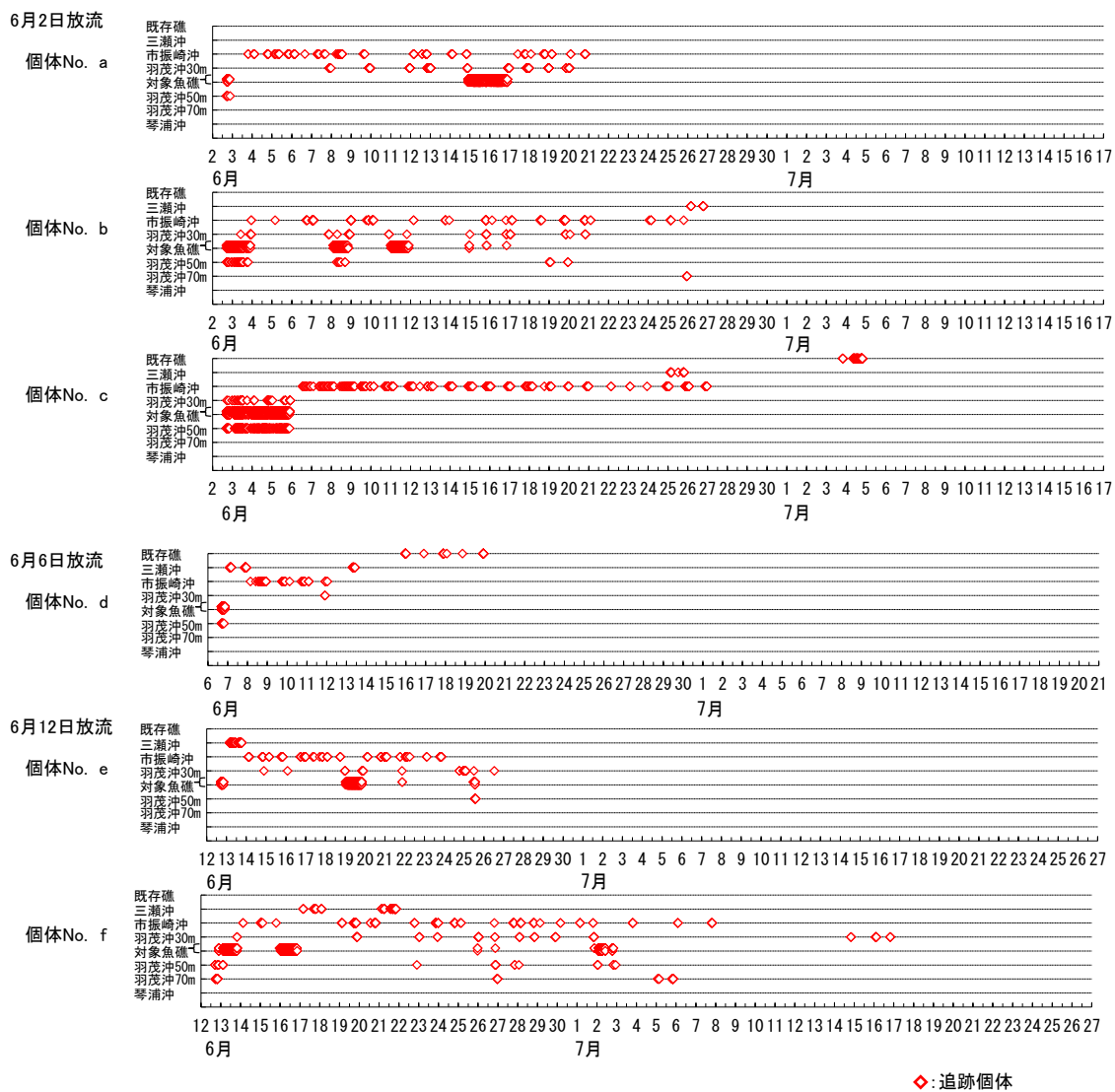


図-2.3.13 マアジの対象魚礁および周辺天然礁への出現状況（2009）

3.3 増殖機能

3.3.1 餌生物と食物網

消化管内容物 マアジ 5 個体の消化管内容物には、軟体動物門新生腹足目の *Atlanta* sp., 節足動物門カラヌス目の *Calanus sinicus* と *Candacia bipinnata*, および端脚目クラゲノミ亜目の *Themisto japonica* を含む 21 分類群が確認された(表-2.3.4)。これらのうち 16 分類群は浮遊性であった。マアジ 1 個体当たりの消化管内容物の出現分類群数は 2~17 分類群で、平均出現個体数は 169 (6~562) 個体、平均湿重量は 0.5 (0.1~1.5) g であった。消化管内容物の少なかった 1 個体を除き、個体数および湿重量ともに、端脚目クラゲノミ亜目の *Themisto japonica* が優占した。

炭素・窒素安定同位体比 マアジと関連する餌生物の炭素・窒素安定同位体比を表-2.3.5 に示した。マアジの $\delta^{13}\text{C}$ の平均値は、血漿では-22.0‰, 筋肉では-18.8‰, $\delta^{15}\text{N}$ の平均値は血漿では 10.3‰, 筋肉では 11.3‰であり、血漿と筋肉では $\delta^{13}\text{C}$ で 3.2‰, $\delta^{15}\text{N}$ で 1.0‰の差がみられた。マアジの血漿に基づいた一段階下の栄養段階の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ は、約-23.0‰と 6.9‰であった。これらの値は、底生動物の端脚目ヨコエビ亜目 (-22.6‰, 7.3‰) に近かった(図-2.3.14)。 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ上でマアジの血漿と一段階下の栄養段階を結んだ直線の延長上に環境中の動物プランクトンが位置した。一方、マアジの筋肉に基づいた一段階下の栄養段階の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ は約-19.8‰と 7.9‰であった。これらの値の周囲には付着動物の多毛綱や短尾族、底生動物の多毛綱、長尾族、および短尾族が認められた。マアジの筋肉と、一段階下の栄養段階を結んだ直線の延長上には、底生動物の異尾族が位置した。

3.3.2 成熟状況

対象魚礁および小木定置網と赤泊定置網（以下、近傍定置網）では、いずれも対馬暖流系群のマアジ雌の成熟・産卵期の指標である *GSI* 値 3 以上の個体(依田ら, 2004) が採捕された。*GSI* 値 3 以上を示した最小全長は 208mm で、この個体は 6 月 10 日に赤泊定置網で採捕された。6 月のみ *GSI* を分析した対象魚礁では、個体ごとの *GSI* 値は全て 3 以上で（最高値は 6 月 10 日の 10.7), 採捕日毎の平均 *GSI* 値は 6 月 2 日では 3.8, 6 月 15 日では 8.1, 翌 16 日では 7.6 であった(図-2.3.15)。一方、5 月から 8 月上旬まで *GSI* 分析を行った近傍定置網では、*GSI* 値 3 以上の出現期間は 5 月 27 日から調査終了の 8 月 6 日までであり、平均 *GSI* 値は 6 月 10 日から 7 月下旬まで（採捕数の少なく小型個体が多く採捕された 7 月 5 日を除く）3 以上を示した。対象魚礁（釣り）と近傍定置網では全長組成がやや異なっていたので両者を単純に比較することは出来ないが（図

-2.3.16), 対象魚礁で採捕されたマアジ雌は前述のように全ての個体が *GSI* 値 3 以上であったのに対し (全長 256~429mm, $n=15$), 近傍定置網での *GSI* 値 3 以上の割合は 60% (208~358mm, $n=55$) であった。

表-2.3.4 マアジの消化管内容物

門	綱	目	科	分類群	全長：221mm		全長：241mm		全長：299mm		全長：326mm		全長：331mm	
					個体数	湿重量 (g)	個体数	湿重量 (g)	個体数	湿重量 (g)	個体数	湿重量 (g)	個体数	湿重量 (g)
扁形動物	条虫			Cestoidea									2	+
紐形動物				Nemertinea	1	+								
軟体動物	腹足	新生腹足	クキレウカ ^イ	<i>Atlanta</i> sp.	○				12	0.01			1	+
				Gastropoda	○	2	0.00	3	0.00					
節足動物	甲殻	カラス	カラス	<i>Calanus sinicus</i>	○				10	0.00				
			カンタ ^キ	<i>Candacia bipinnata</i>	○				43	0.03				
			ユウカラス	<i>Eucalanus attenuatus</i>	○				4	0.01				
				<i>Eucalanus crassus</i>	○				1	0.00				
				<i>Eucalanus</i> sp.	○				4	0.00				
			ユ-キ-タ	<i>Paraeuchaeta russelli</i>	○				5	0.01				
				<i>Paraeuchaeta</i> spp.	○				11	0.13				
				Euchaetidae (copepodid)	○				1	+				
		ホ ^イ キロストム	オンケア	<i>Oncaea clevei</i>	○				1	+				
		端脚	アゴ ^ナ カ ^ヨ コエ ^ビ	Pontogeneiidae									1	+
			クラゲ ^ノ ミ	<i>Themisto japonica</i>	○	96	0.13	23	0.03	10	0.01	592	1.22	
		十脚	オキエ ^ビ	<i>Leptochela gracilis</i>	○				5	0.00				
			ホンヤト ^{カリ}	Paguridae (zoea)	○				6	0.01				
				Anomura (Glaucothoe)	○				1	+				
毛顎動物	矢虫	無膜	ヤムシ	<i>Sagitta</i> spp.	○				7	0.09				
脊椎動物	硬骨魚			Osteichthyes (larva)					1	0.00				
				Osteichthyes (scale)									2	+
不明				(ゼラチン質)									—	0.10
				(不明動物破片)	—	0.18	—	0.32	—	0.23	—	0.29		
種 類 数					4		3		17		2		5	
合 計					99	0.31	26	0.35	122	0.40	592	1.51	6	0.10

注) 分類群名の○は浮遊性を示す。「+」は0.001g未満を、「—」は計数不能を示す。

表-2.3.5 マアジと関連する餌生物の炭素・窒素安定同位体比

試料		$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	検体数
		平均 $\pm$ S. D.	平均 $\pm$ S. D.	
マアジ	筋肉	-18.8 $\pm$ 0.6	11.3 $\pm$ 0.3	34
	血漿	-22.0 $\pm$ 0.4	10.3 $\pm$ 0.3	26
動物プランクトン		-23.2 $\pm$ 0.8	5.9 $\pm$ 0.1	3
POM		-23.7 $\pm$ 0.8	6.4 $\pm$ 1.0	3
付着動物	多毛綱	-20.6 $\pm$ 1.1	7.9 $\pm$ 0.4	3
	短尾族	-20.1 $\pm$ 0.6	7.9 $\pm$ 0.4	4
	端脚目(ヨコエビ亜目)	-21.8 $\pm$ 0.4	6.5 $\pm$ 0.6	5
	端脚目(ワレカラ亜目)	-22.2 $\pm$ 0.6	5.6 $\pm$ 0.2	4
底生動物	多毛綱	-19.6 $\pm$ 0.8	8.1 $\pm$ 0.3	5
	長尾族	-19.8 $\pm$ 0.5	8.0 $\pm$ 0.5	5
	短尾族	-19.8 $\pm$ 1.3	7.4 $\pm$ 0.9	5
	異尾族	-20.1 $\pm$ 0.5	5.8 $\pm$ 0.4	5
	端脚目(ヨコエビ亜目)	-22.6 $\pm$ 1.3	7.3 $\pm$ 0.3	3
	端脚目(ワレカラ亜目)	-22.4 $\pm$ 0.6	4.6 $\pm$ 1.1	3
底質		-21.7 $\pm$ 0.2	4.3 $\pm$ 0.3	5

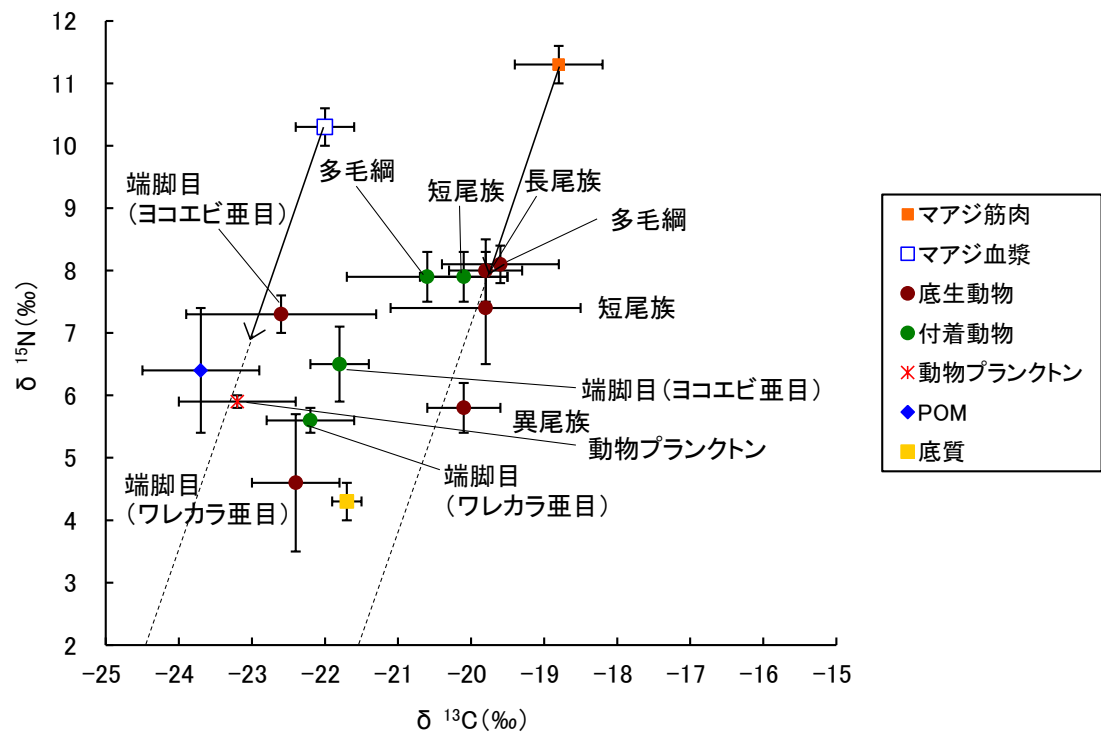


図-2.3.14 マアジと関連する餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ

- 注) 1. エラーバーは標準偏差を示す。
 2. 矢印の先端は1段階下の栄養段階の推定値を, 点線は推定される食物網を示す。

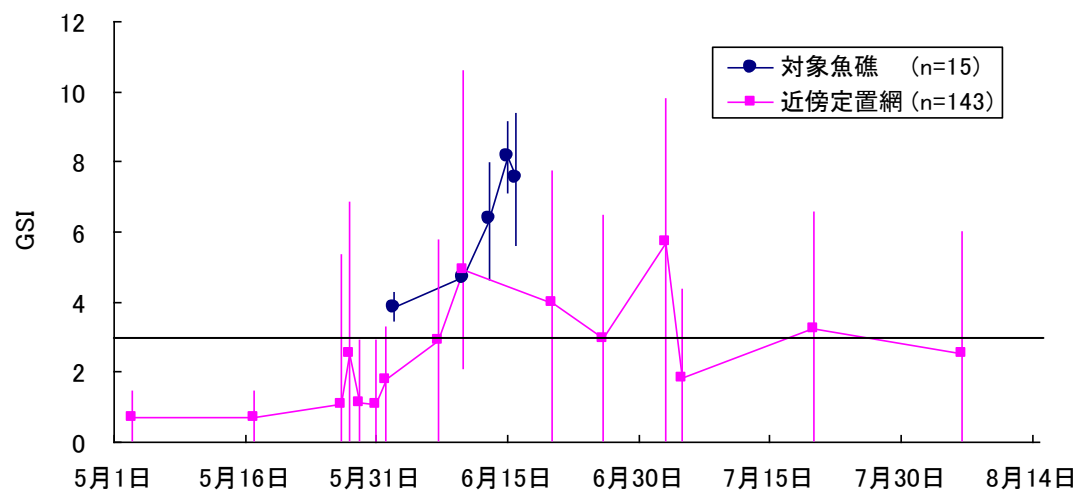


図-2.3.15 マアジ雌の平均 GSI の推移

注) 1. エラーバーは最大値と最小値の範囲を示す。

2. GSI 値 3 以上がマアジの成熟および産卵期間中を示す(依田ら 2004)。

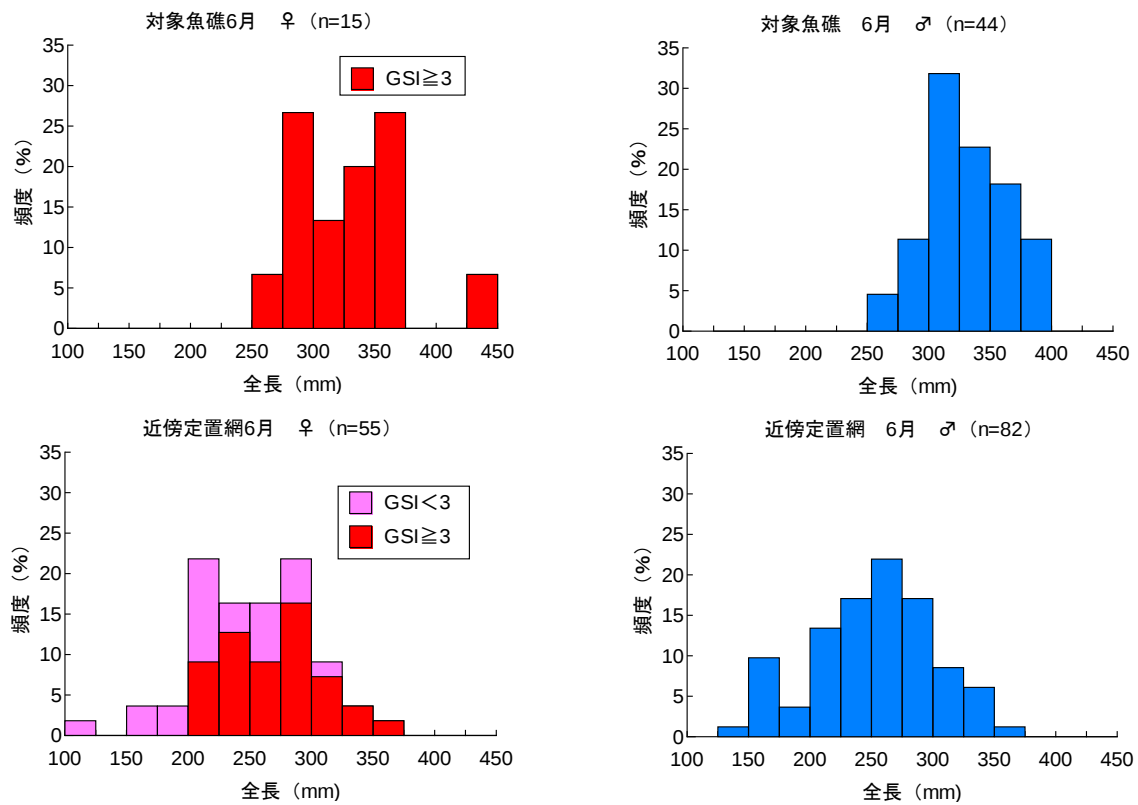


図-2.3.16 対象魚礁および近傍定置網で採捕された
マアジの全長組成と雌の GSI

4. 考察

本研究を行った 2008 年 6 月から 8 月における対象魚礁の中段部にあたる水深 28m 地点の水温は 11~26℃の範囲にあり、その上昇傾向は 6 月上旬から 7 月下旬までは緩やかで、8 月上旬には急激であった（図-2.3.1）。水深 20~30m 層付近には、水温・塩分躍層が認められた（図-2.3.2）。流向は全ての水深帯で西流あるいは西南西流が卓越した（図-2.3.3）。流速は、19.9cm/s（水深 20m）以下が 90%以上を占めた。マアジ（尾叉長 210~260mm）の生息水温（7~9 月）は約 15~25℃であり（山田，1969），マアジの巡航速度（回流水槽の上流側に 60 分間で滞留頻度が 50%を切る流速）は、42.9cm/s であることから（安永，1985），対象魚礁の水温および流速による環境がマアジの遊泳行動を大きく制限する要因とは考えられなかった。また、佐渡島の近傍定置網の操業期間は 2 月から 8 月であり、マアジの漁獲は 3 月から 7 月がピークであることから（水産庁，2009），本研究を行った 6 月から 8 月はマアジの蛸集機能を評価する調査期として妥当であると判断された。

マアジの蛸集機能 対象魚礁とその周辺に 6 月から 8 月上旬前半まで蛸集したマアジの全長は、173~418mm の範囲であった（図-2.3.4）。採捕されたマアジの全長組成は 2 週間程度の調査間隔では変わらなかったが、それ以上ではどちらも明らかに小型化した。このことは、調査期により来遊するマアジの年齢群が異なっていたことを示している。新潟県沿岸におけるマアジの年齢と全長の関係から推定すると（西田ら，1994），6 月 2~4 日の来遊群は主に 4+群，6 月 30 日~7 月 3 日と 16 日では主に 2+群，8 月 3~5 日では主に 1+群が主体と考えられる。従って、対象魚礁は時期により異なった年齢群によって利用されており、6 月から 8 月へとより若齢化したものと考えられる。

2008 年 7 月 9 日の昼間、対象魚礁へのマアジの蛸集重量は約 1.53 t であり、昼間の蛸集量は夜間の 7.1 倍に達していた（表-2.3.1，図-2.3.6）。従って、対象魚礁は昼間、マアジに対して蛸集機能を有していると評価できる。本研究で得られた蛸集量は、対象魚礁から西に 5km 離れた小木定置網における 2008 年のマアジの年間水揚量約 50 t（水産庁，2009）の 3%相当を 1 日で蛸集させる機能があることになる。

対象魚礁や天然礁におけるマアジ個体の行動は、昼間には対象魚礁あるいは天然礁の中層から底層に蛸集し、夜間には礁から離脱し、周辺海域の表層を遊泳するといった水平方向と垂直方向に明確な日周行動を有し、礁間の移動を計測できた最大で 7 日間（追跡中断を含む）繰り返した（図-2.3.11，図-2.3.12）。マアジが夜間に対象魚礁および天然礁から離脱する時間帯は、日没の約 30 分前から日没後約 2 時間の間であった（図-2.3.7，図-2.3.8）。再び礁に蛸集する時間

帯は日の出の約 2 時間前からほぼ日の出までの間であり、礁の離脱・蟬集には日の出と日没の日周性に関連があることが明らかとなった。このような日周行動はマグロ類では浮魚礁において確認されているが（財団法人 漁港漁場漁村技術研究所, 2009）、アジ科における個体追跡では、はじめて確認された。マアジの夜間の離脱時の遊泳範囲は対象魚礁を中心とした 3km 圏内の海域であった（図-2.3.7, 図-2.3.10）。さらに、設置型受信機による結果から、マアジ個体は対象魚礁や天然礁に数日間滞留しながら設置型受信機を設置した 7km 程度の海域内に 1 ヶ月程度滞留することが明らかとなった（図-2.3.13）。

マアジ魚群の遊泳位置から、昼間は対象魚礁の潮上側の中層から底層に蟬集していることが明らかとなった（図-2.3.5, 図-2.3.6）。日没後には中層から表層に向けて浮上する傾向を示し、夜間には礁を離脱・分散し、潮上側に蟬集する行動はみられなくなった。計量魚探によって得られた対象魚礁周辺でのマアジ魚群の行動は、発信機によるマアジ個体の行動と概ね符合していたことから、マアジ個体の行動は、魚群全体の日周行動を反映しているものと考えられる。

また、他海域におけるマアジの日周行動については、伊藤ら（2012）によって鹿児島県阿久根地先の人工マウンド礁〔石材を用いた人工山脈；水深 63m, 形状（高さ 14m×幅 70m×長さ 190m）〕において本研究と同様の発信器を用いて 2011 年 5 月 31 日から 7 月 30 日まで 5 回（1 昼夜 2 ケース, 3 昼夜 3 ケース）実施されている（表-2.4.1）。その結果においてもマアジは昼間には人工マウンド礁や周辺の天然礁および人工魚礁に蟬集し、夜間は離脱・遊泳しながら概ね 8km の範囲内に留まる行動であった（図-2.4.1, 図-2.4.2）。このことから、設置海域や設置水深が異なる海域においても、マアジの日周行動や数日間繰り返し人工魚礁や天然礁に蟬集する行動など、本研究と同様の結果が得られている。

マアジの増殖機能 マアジに対する対象魚礁の餌場機能を検討するため、対象魚礁周辺に出現したマアジの消化管内容物を解析した（表-2.3.4）。昼間、対象魚礁の潮上に蟬集したマアジ（1+～3+群）の消化管内容物には 21 分類群が確認された。そのうち 16 分類群は浮遊性の動物プランクトンであり、日本海における主要な出現種で魚類の餌生物としても重要である節足動物門端脚目クラゲノミ亜目の *Themisto japonica*（Ikeda, 1990）が優占した。さらに、マアジの筋肉および血漿の炭素と窒素の安定同位体比を用いて、マアジにおける食物網を解析した（表-2.3.5, 図-2.3.14）。魚類の半更新時間は、血漿で約 3 日である（石樋・横山, 2008）。マアジの血漿を基準にみると、短期的（3 日間程度）には、動物プランクトンを餌生物として利用していると推察された。

マアジの摂餌には日周性があり、夜間の 8～10 時間は絶食状態にある（鈴木, 1965）。消化管内容物を調査したマアジは、対象魚礁のごく近傍で、夕方に投網、

翌朝に揚網された刺網の採捕物である。このこととマアジの離脱・蛸集時間を考えると、採捕されたマアジは刺網が投網された夕方から離脱を終える日没後 2 時間まで、あるいは蛸集をはじめる日の出約 2 時間前から揚網時までに摂餌していたことが考えられる。さらに、魚類の摂餌による消化時間は 5~7 時間であることから（示野，1983），マアジの消化管内容物は蛸集をはじめる日の出約 2 時間前から揚網時までに摂餌していたものであると考えられる。

以上のことから、マアジは昼間対象魚礁の潮上側に蛸集し、浮遊している動物プランクトンを餌生物として積極的に利用していることから、対象魚礁は昼間蛸集したマアジの餌場として機能していると考えられる。

マアジに対する対象魚礁の産卵場機能を検討するため、対象魚礁周辺に出現するマアジ雌の *GSI* を解析した（図-2.3.15，図-2.3.16）。なお，*GSI* の解析は 2009 年の 5 月から 8 月にかけて行ったが、同時に水温，流向，および流速の調査を行い、マアジの生息環境が 2008 年と同様の傾向であったことを確認した（水産庁・（財）漁港漁場漁村技術研究所，2010）。

対象魚礁周辺で採捕されたマアジの雌は、全長 208mm 以上、2+~4+群で成熟・産卵期の指標である *GSI* 値 3 以上に達していた（依田ら，2004）。また、成熟雌は表層水温が 15℃以上になると出現した。マアジは東シナ海から本邦にかけて産卵場が形成され、北上するに伴い産卵期が遅くなる。対馬暖流系群の産卵適水温は約 15~17℃であり（依田ら，2004），対馬暖流系群の日本海西部での産卵期は 6~7 月である（落合ら，1998）。対象魚礁周辺におけるマアジの成熟・産卵期は 5 月下旬から 8 月上旬であり、本研究の結果、対象魚礁には少なくとも 6 月には成熟・産卵期の個体が蛸集した。マアジが対象魚礁周辺で産卵するかは直接観察できていないので不明だが、少なくとも産卵に至る時期この対象魚礁周辺を利用しており、マアジの蛸集は産卵に対して一定の効果が認めらるであろう。

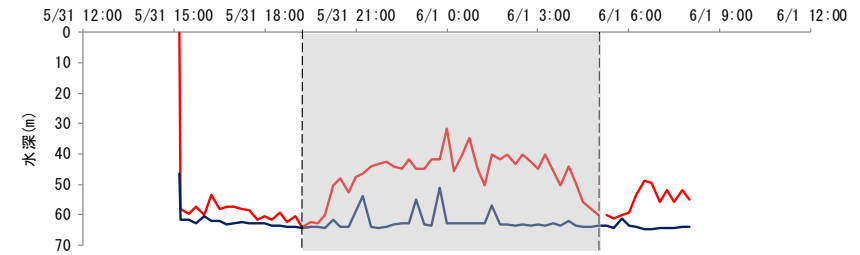
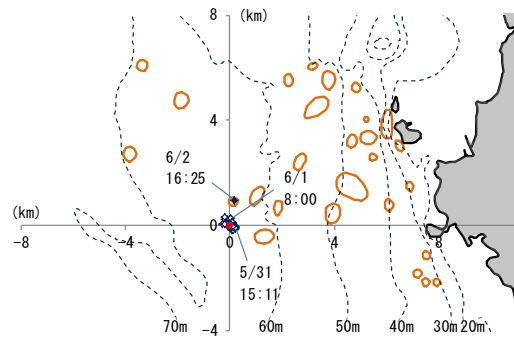
以上のことから、マアジの群れは人工魚礁およびそれによって形成される海底地形を選択して、その周辺海域に蛸集し、特に昼間は餌場として産卵親魚が積極的に利用していることが示唆された。人工魚礁を 3km 程度の海域に複数基を配置し、禁漁等の漁場管理を併せて行うことにより、マアジの増殖に寄与するものと考ええる。

表-2. 4. 1 鹿児島県阿久根沖人工マウンド礁における発信器による追跡状況の概要（2011）

個体No.	放流日時	追跡時間	1日あたりの礁への平均滞留時間	行動の特徴
A	5月31日 15:11	16時間49分	－	放流当日の昼間は人工マウンド礁に蛸集。夜間も人工マウンド礁近傍を遊泳し、翌日の昼間も人工マウンド礁に蛸集。
B	6月4日 17:18	14時間42分	－	放流当時の昼間は人工マウンド礁に蛸集せず、離脱・遊泳し、翌日の昼間に岸側の天然礁に蛸集。
C	7月1日 16:24	52時間36分	22:30	放流当時から追跡終了まで人工マウンド礁に蛸集。3日後の夜間に人工マウンド礁から離脱・遊泳を開始。
D	7月14日 17:10	62時間50分	13:30	放流当日の昼間は人工マウンド礁に蛸集。夜間は礁を離脱・遊泳して、2日目以降は、昼間は岸側の天然礁に蛸集し、夜間は礁から離脱・遊泳。
E	7月27日 16:54	63時間06分	10:37	放流当日の昼間は放流直後30分程度人工マウンド礁に蛸集した後、離脱・遊泳し、人工マウンド礁周辺海域を遊泳。夜間、離脱・遊泳し、翌朝、人工マウンド礁の沖側の海域に到達した後、日中は徐々に移動し、人工マウンド礁の近傍の天然礁で滞留。夜間には、離脱・遊泳し、3日目以降の昼間は岸側の天然礁に滞留。

注) No.A, Bは一昼夜の追跡のため、1日あたりの礁への滞在時間は求めている。

No. A



No. B

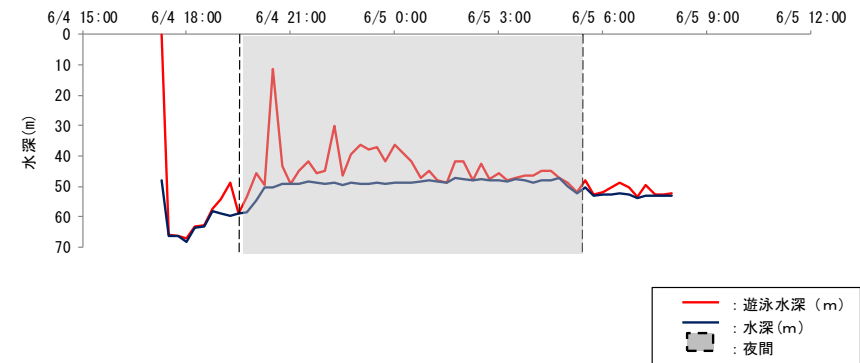
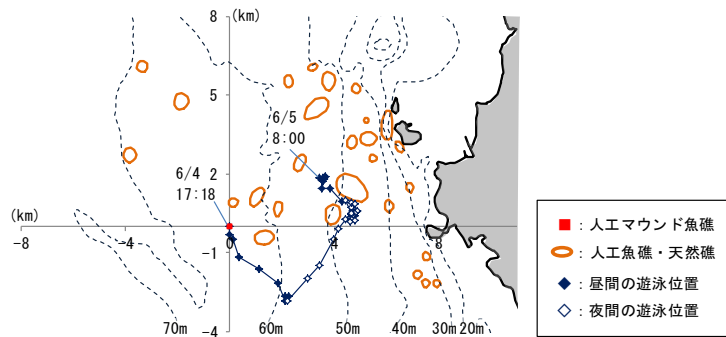
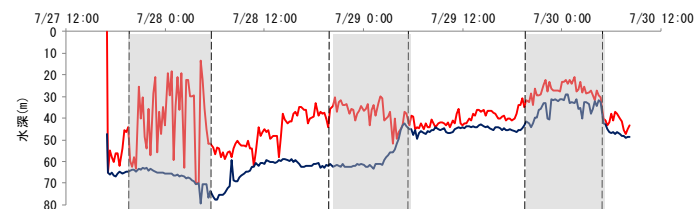
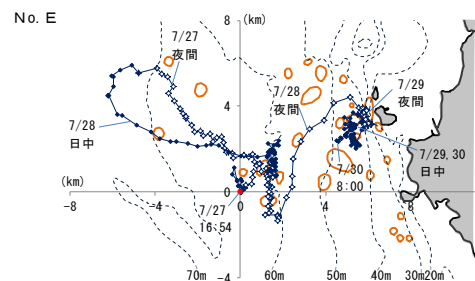
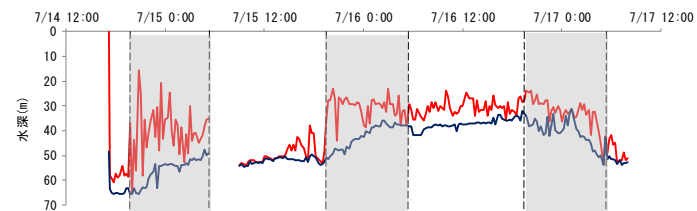
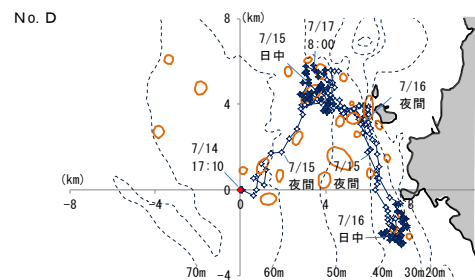
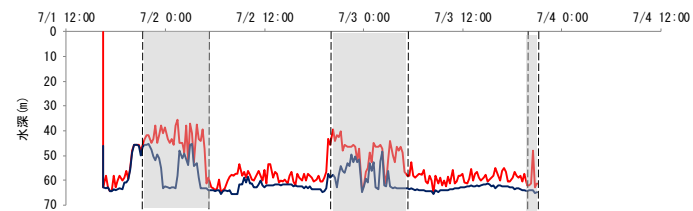
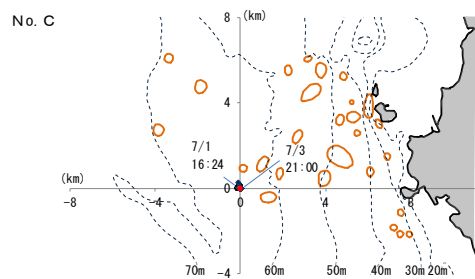


図-2.4.1 鹿児島県阿久根沖人工マウンド礁におけるマアジの水平移動（左）と鉛直移動（右）（1昼夜）

- 注）1. 縦軸は南北方向、横軸は東西方向を示す（左）。
 2. No. は個体番号を示す。
 3. 各プロットはマアジの15分毎の遊泳場所を示す。



■ : 人工マウンド魚礁
 ○ : 人工魚礁・天然礁
 ◆ : 昼間の遊泳位置
 ◇ : 夜間の遊泳位置

— : 遊泳水深 (m)
 — : 水深 (m)
 ■ : 夜間

図-2.4.2 鹿児島県阿久根沖人工マウンド礁におけるマアジの水平移動（左）と鉛直移動（右）（3昼夜）

注) 1. 縦軸は南北方向、横軸は東西方向を示す(左)。

2. No. は個体番号を示す。

3. 各プロットはマアジの15分毎の遊泳場所を示す。

第3章 ズワイガニの蛸集による漁獲からの保護効果と 産卵場としての増殖機能

1. はじめに

ズワイガニ *Chionoecetes opilio* は、北極海のアラスカ沿岸とグリーンランド西岸、北アメリカの大西洋と太平洋沿岸、ベーリング海、オホーツク海、日本海および茨城県以北の太平洋沿岸などに広く分布する底生の大型ベントスである。日本海では、日本海を環状にとりまく陸棚の縁辺部と日本海中央部の大和堆の水深約 200～500m の範囲に生息する（桑原ら，1995；福井県水産試験場，1998）。日本海のズワイガニは成熟後、主たる分布水深を雌雄により異にし 260～300m を境に、より浅い水深帯では雌ガニが、より深い水深帯では雄ガニがそれぞれ卓越して分布する（桑原ら，1995）。

ズワイガニの日本海における漁獲量は、1970 年に約 16,000t となったが、それ以降は減少し、1992 年には 2,000t を下回った（水産庁，2007）。このことから資源回復の取り組みとして、1996 年に「海洋生物資源の保存および管理に関する法律（TAC 法）」の対象種となった。このほかの取り組みとして、体長制限や操業期間の制限などの漁業規制が行われている。また、ズワイガニが生息する海底の一定区画に人工魚礁を設置し、その区域を「保護区」とする事業が 1982 年の京都府を皮切りに石川県、福井県、兵庫県および鳥取県で実施されている。さらに、2007 年よりフロンティア事業として国の直轄事業が実施されている。

これらの保護効果を確認するため、カゴ網による採捕調査が実施されてきた。しかし、調査漁具の漁獲特性が十分に把握されていなかったため、定量性に疑問が残されていた（Okutani, 1969; 橋本ら，1985）。採捕調査以外の方法では有人潜水艇「しんかい 2000」[以下、しんかい 2000；海洋科学技術センター（現：海洋研究開発機構）]、曳航式深海用ビデオカメラおよび自航式水中ビデオカメラ（Remotely operated vehicle）（以下、ROV）による直接視認がある（小林ら，1991；大橋，1993；渡部ら，2001）。しかし、大水深域において構造物のある海底を探索することによる調査機材の破損などのリスクから、保護区周辺での観察が僅かに行われているものの、魚礁単体に対するズワイガニの蛸集など直接的な有効性については確認されていない。さらに、保護区周辺で生産される餌生物とズワイガニとの関係や成熟状況など、保護区が有すると考えられる増殖機能の検討は行われていない。

そこで、本研究では兵庫県津居山沖に設置された保護区を対象に、採捕調査と ROV による視認観察を同時期に組み合わせて行うことにより保護区のズワイガニの蛸集による漁獲からの保護効果を検討した。さらに、保護区周辺に出現した動物群との捕食-被捕食関係とズワイガニの成熟状況を調べ、保護区における増殖機能を検討した。

2. 方法

2.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺環境

本研究で調査対象とした人工魚礁（以下、保護区）は、1994年から1996年に日本海西部に位置する兵庫県津居山沖の水深 282～306m（中心 36° 3.97'N, 134° 46.40' E）の地点に、設置されたものである（図-3.2.1）。また、保護区から南西方向に 4.5km 離れた同一水深帯の人工魚礁の設置されていない地点を対照区とした。保護区および対照区の周辺の海底は平坦で、砂泥質である。保護区には 4km×4km の範囲内に、構造形式の異なる 4 タイプ（FP3.25 型：96 基、プラス 6A 型：16 基、神鋼 N300 型：13 基、および 2m 角型：400 基）の魚礁単体が計 525 基設置されている（図-3.2.2、表-3.2.1）。

ズワイガニの生息環境を把握するため保護区と対照区において 2007 年 7 月 9 日に STD（ASTD687, アレック電子社製）により、海面直下から水深 285m の海底面まで 1 m 毎に水温・塩分を測定した。底質は、採泥器（スミス・マッキンタイヤ型; 1/20m², 重鎮 10kg）を用いて、保護区と対照区の底質を採取し冷蔵保存したものを、分析の試料とした。分析は粒度組成、密度、化学的酸素要求量（以下、COD）、強熱減量、およびクロロフィル a とした（表-3.2.2）。底生動物は、採泥器によりそれぞれで 2 回採取し、1mm メッシュのふるいにかけて、ふるい上に残ったものを分取し、分析の試料とした。分取した試料は 10% の中性ホルマリンで固定後、分類群に同定し、それらの個体数および湿重量を計数、測定した。

2.2 保護効果と魚介類の蜻集状況

カゴ網による採捕調査は保護区と対照区で各 1 回行った（表-3.2.3）。カゴ網の投網は、2007 年 7 月 9 日の昼間に行った。揚網は、保護区では 7 月 10 日の昼間に、対照区では 7 月 11 日の昼間に行った。カゴ網は鉄枠（底面の直径 130cm, 上面の直径 80cm, 高さ 47cm）に、ポリエチレン製の網糸の網地（蛙又結節, 目合 33.7mm）のものを使用した（図-3.2.3）。カゴ網の幹縄への取り付けは 100 m 間隔で 20 個を取り付けた（図-3.2.4）。1 カゴあたり冷凍サバ 4 個体（500g 程度）を餌として用いた。カゴ網の投網は、調査船（兵庫県漁業調査船たじま：140t）に搭載した潮流計（CI-30, 古野電気社製）により、海面付近の潮流方向を計測し、潮上から潮下方向に行った。揚網したカゴ網は、ズワイガニの雌雄別の個体数と、甲幅（mm）を計測した。本種には最終脱皮（成熟開始年齢雄 11 齢, 雌 11 齢; 水産庁 2013）があり、最終脱皮後に成体ガニとなる（山崎, 1991）。雄は最終脱皮後に鉗脚（はさみ脚）が甲幅に対して大きくなる（山崎, 1991）。そのため本研究では甲幅と同時に鉗脚幅を測定し、以下の定式化された判別式（日本海区水産研究所, 未発表資料）を用い、最終脱皮の有無を判断した。雌は成熟後、卵を腹に抱くことから目視で卵を確認し、成熟個体と判断した。

$$Z = 1.327 \log(CW) - \log(CH) - 1.3696 \quad \dots\dots\dots (1)$$

CW：甲幅 (mm) CH：鋏脚幅 (mm)

最終脱皮個体： CW $\geq$ 130 または Z $\leq$ 0

最終脱皮前個体： CW $<$ 60 または Z $>$ 0

ROV(RTV300-MK II, 三井造船社製) (図-3.2.5, 図-3.2.6, 表-3.2.4) を用いて 2007 年 7 月 9 日から 12 日と 18 日に, 保護区 7 回と対照区 1 回の合計 8 回, 海底面上の観察を行った(表-3.2.5)。ROV の潜行前, 保護区では魚群探知機 (FCV-30, 古野電気社製) を用いて海底面を探索しながら魚礁単体の位置を確認し, その位置情報を調査船および ROV オペレーションシステムのプロッターに入力した。

調査船を魚礁単体の直上に出来るだけ近づけて定位させるため, 風向や潮流を勘案して投錨を行い, 船が定位した段階で ROV を潜航させた。ROV の航走時は海底との接触を避けるため海底面から浮上させ, 前傾姿勢を取った。搭載されているスキャニングソナーによって魚礁単体の位置を探索しながら海底を移動し, 出現したズワイガニを含む魚介類をビデオ映像として収録するとともに, スチル写真を撮影した。魚礁単体が確認された場合には, 可能な限り魚礁単体に接近し, 魚礁単体内部や周辺の海底の観察を行った。一方, 対照区では, 魚群探知機による事前の海底探索は行わず, 投錨し, 調査船が定位したところで ROV を潜航させ, 保護区と同様にビデオ収録するとともにスチル撮影を行った。

ROV の走行距離より観察面積を算出し, ズワイガニを含む魚介類の生息密度を求めた。ここで, 観察幅 B は, ROV に搭載されたビデオカメラの海底からの高さ 0.5m (カメラの取り付け高, 0.35m ; 浮上分, 0.15m), カメラの俯角 (25°), 水平画角 (73.4°) を (2) (3) 式に代入し, 1.76m とした (図-3.2.7)。

$$A = H / \cos (90 - \alpha) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$B = 2A \cdot \tan (\beta / 2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

A : カメラの光軸距離, H : カメラの海底からの高さ, α : カメラの俯角

B : 観察幅 β : 水平画角

航走距離 L は, ROV の上部後端に装備されたトランスポンダーからの位置情報と, 船上の DGPS と連動させた水中測位装置により求めた。観察幅 B に航走距離 L を乗じて観察面積とした。録画された映像記録からズワイガニを含む魚介類の個体数を計数し, 生息密度 (個体/1,000 m²) を算出した。本章では得られた個体数を魚礁単体からの距離別に, 魚礁単体表面および直下から 0.5m の海底 (以下,

魚礁単体内), 魚礁単体 0.5~5mまでの海底 (以下, 魚礁単体近傍), および 5m
以遠の保護区内の海底 (以下, その他) に区分し, 生息密度を比較した。

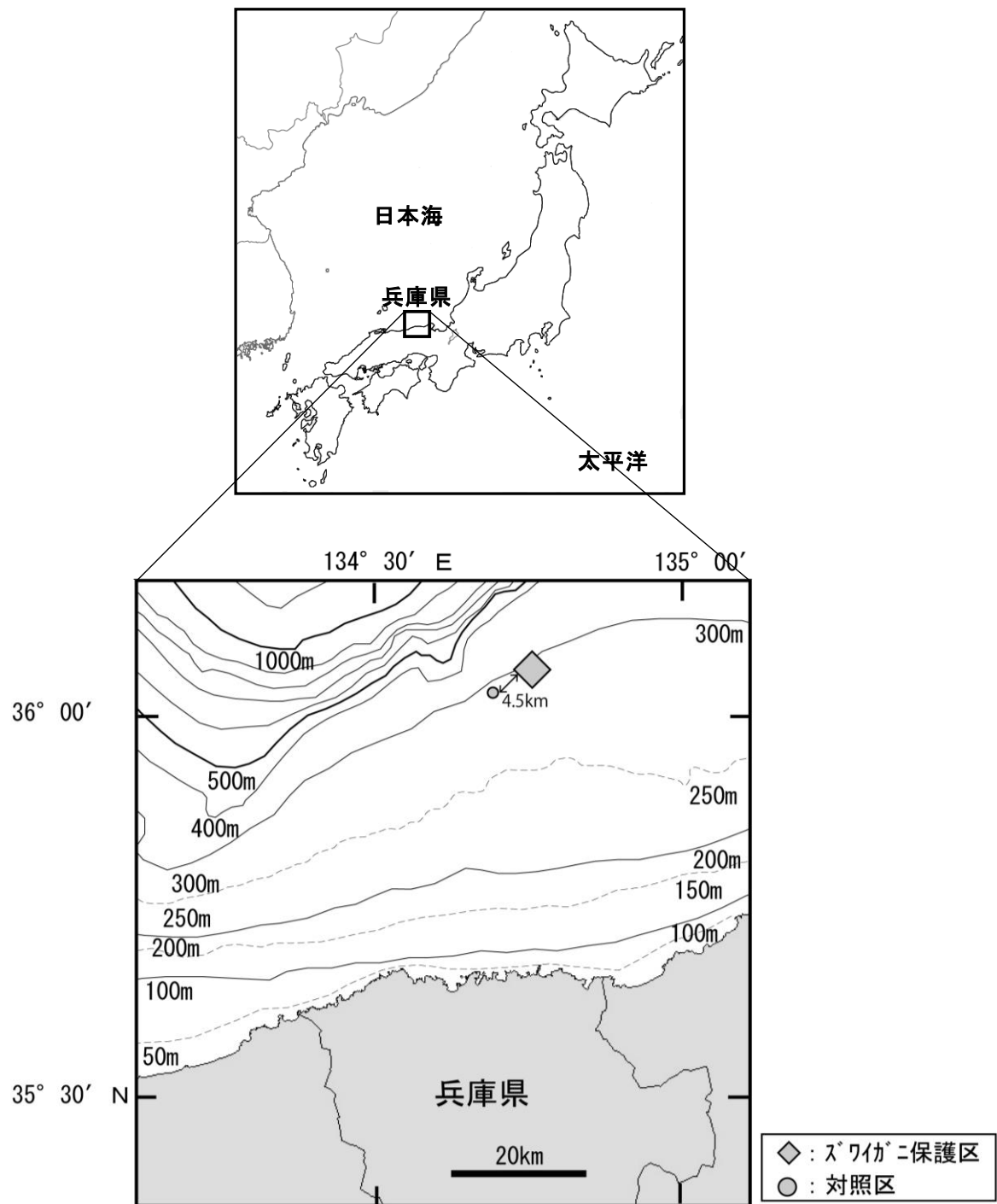
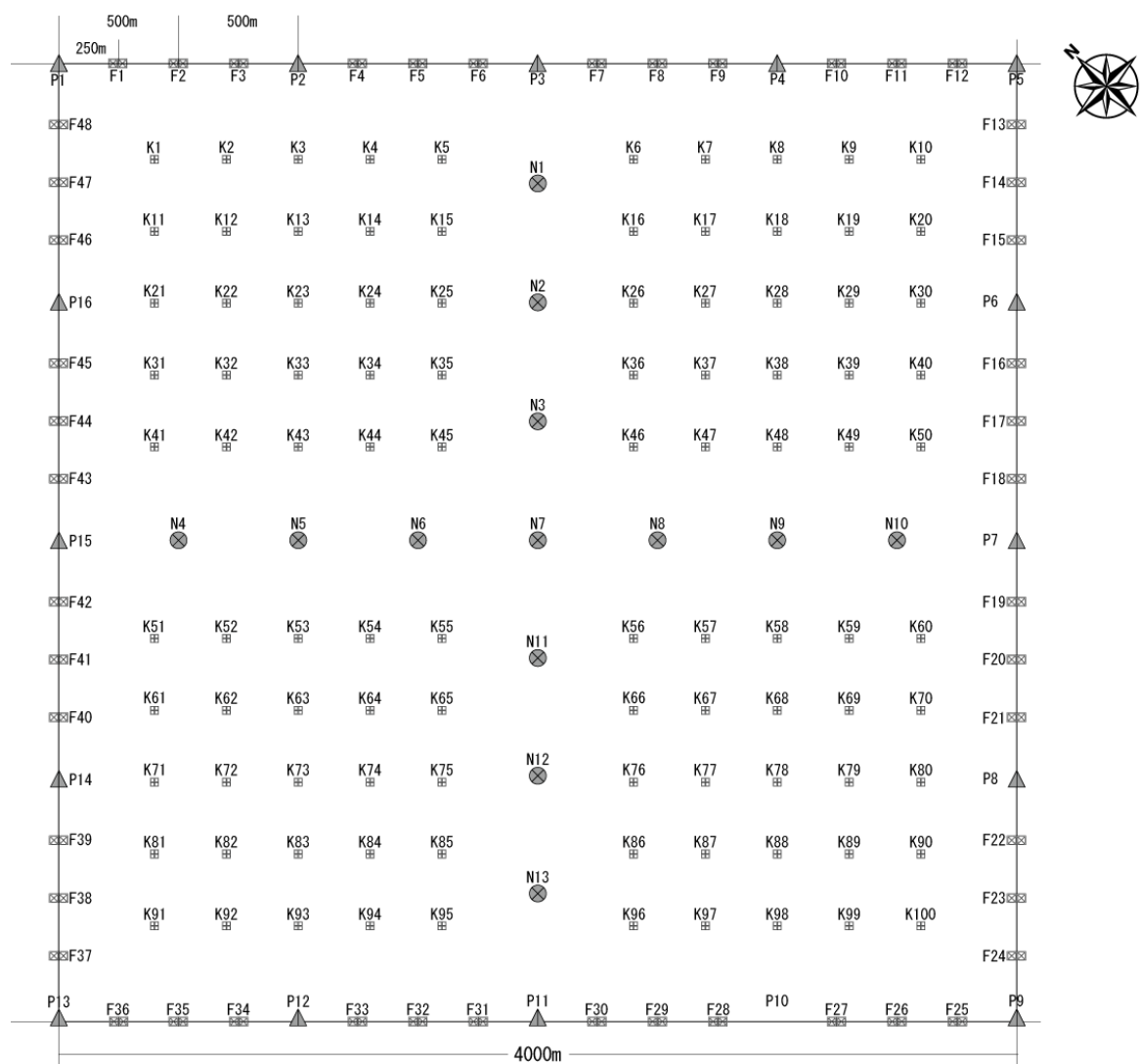


図-3.2.1 調査海域（兵庫県津居山沖）



魚礁タイプ	設置個数
☒ F:FP魚礁3.25型	96
⊗ N:神鋼N-300型	13
▲ P:プラス6A型	16
□ K:2m角型魚礁	400

図-3.2.2 保護区の魚礁単体の配置図

表-3.2.1 保護区で用いられている魚礁単体の緒言と構造図

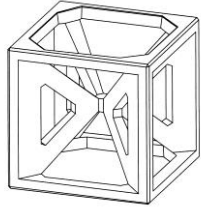
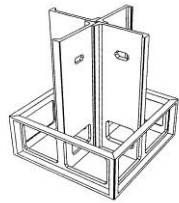
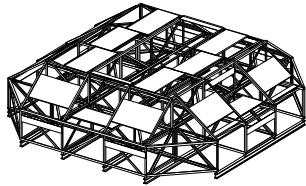
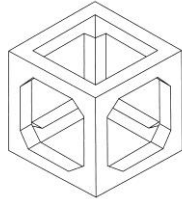
名称／形式	緒元	構造図
F P 3.25m型	縦×横×高さ (m) : 3.25×3.25×3.25 空中重量 : 13.02 トン 空間容積 : 34.3 空m ³	
プラス6 A型	縦×横×高さ (m) : 5.35×5.35×6.00 空中重量 : 32.75 トン 空間容積 : 64.2 空m ³	
神鋼 N300 型	縦×横×高さ (m) : 10.98×10.98×3.20 空中重量 : 15.80 トン 空間容積 : 307.0 空m ³	
2m角型魚礁	縦×横×高さ (m) : 2.00×2.00×2.00 空中重量 : 3.43 トン 空間容積 : 8.0 空m ³	

表-3. 2. 2 底質の分析項目と分析方法

項目	分析方法(出典)
粒度組成	ふるい分け法、沈降法 (JIS A1204)
密度	比重びんによる測定 (JIS A1202)
CODsed	アルカリ性過マンガン酸カリウム消費量によるヨウ素適定法(底質調査法Ⅱ.20)
強熱減量	600℃の強熱による恒量の測定 (底質調査法Ⅱ.4)
クロロフィルa	蛍光法(海洋観測指針)

表-3.2.3 カゴ網の設置位置

	保護区	対照区
起点	36°04.0' N	36°01.9' N
〃	134°45.1' E	134°41.2' E
終点	36°04.0' N	36°0.9' N
〃	134°46.4' E	134°42.5' E
水深(m)	290-299	292-299
カゴ数	20	20

注) 起点はNo. 1のカゴを, 終点はNo. 20のカゴ投入位置を示す。

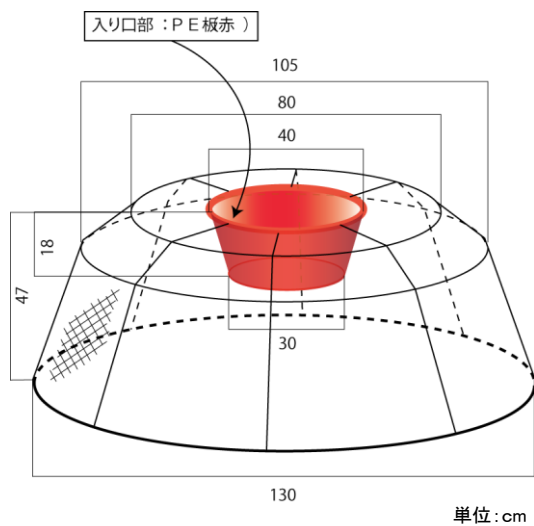


図-3.2.3 カゴ網の仕様

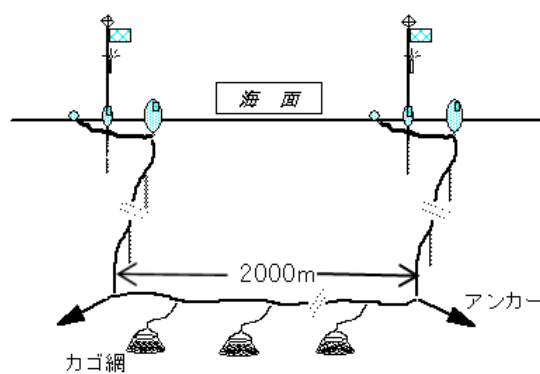


図-3.2.4 カゴ網の設置状況

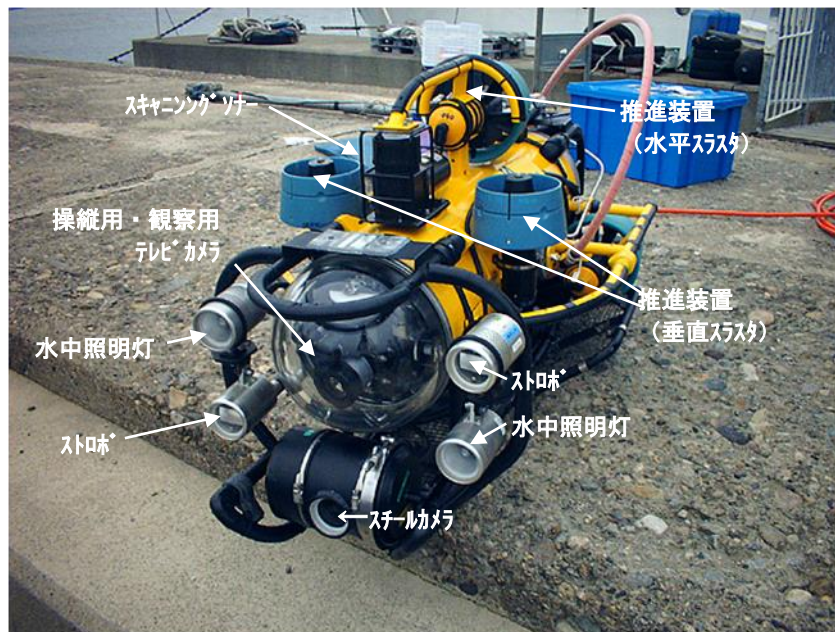


図-3.2.5 ROV 本体 (RTV300-MK II ; 三井造船社製)

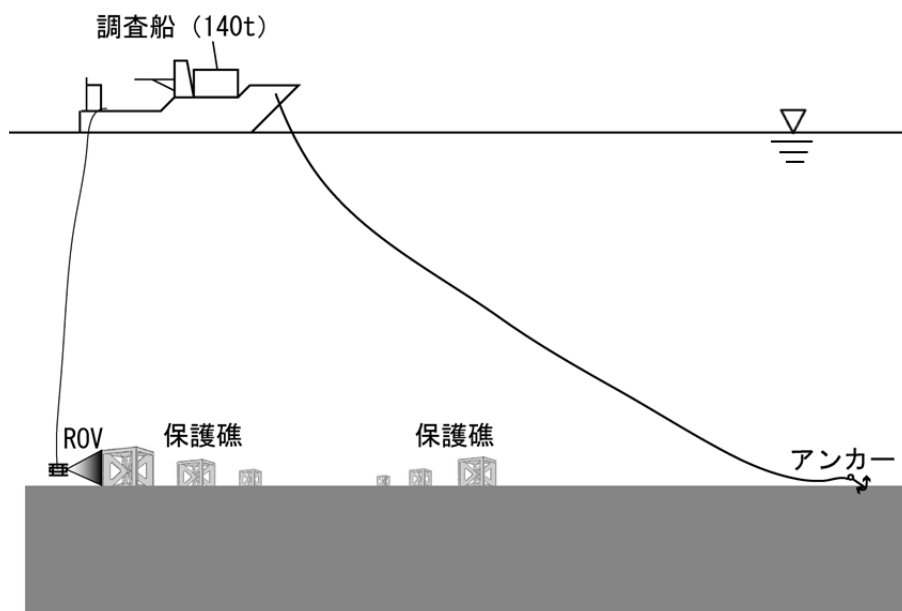


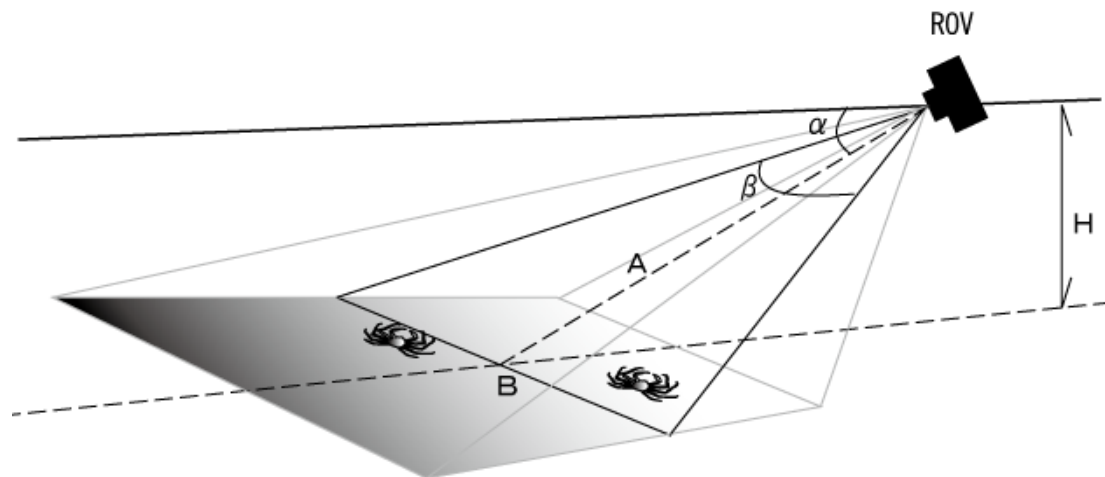
図-3.2.6 ROV 調査の方法

表-3. 2. 4 ROV の緒元

ROV本体最大使用深度		300m
映像装置		
操縦用カラーTVカメラ		
	撮像素子 解像度	1/2インチCCD 固体撮像素子 480本以上(水平部)
観察用カラーTVカメラ		
	撮像素子 解像度	1/3インチ3CCD 固体撮像素子 530本以上(水平部)
パンチルト装置		
	パン角度	水平±20°
	チルト角度	上下±50°
水中照明灯		ハロゲンランプ 150W×2灯
スチールカメラ		キャノン EOS kiss5
ストロボ		
	発光量	GN・m 40(ASA400)×2灯
推進装置		
	水平スラスト	出力 400W×3台
	垂直スラスト	出力 220W×2台
	横スラスト	出力 220W×1台
スキャニングソナー		
	探索レンジ	6～150m
	スキャニング範囲	360°
	ビーム幅	水平 2.2° — 垂直 25°
	周波数	525kHz

表-3.2.5 ROVによる観察場所

調査地区	保護区							対照区	合計
観察回	1	2	3	4	5	6	7	保護区計	8
緯度経度									
北緯	36°02.8'	36°03.1'	36°02.9'	36°02.8'	36°03.1'	36°03.0'	36°02.9'		36°02.1'
東経	134°46.1'	134°46.1'	134°45.5'	134°45.6'	134°46.1'	134°45.2'	134°46.1'		134°41.3'
観察した 魚礁単体				FP 3.25型		プラス 6A型	FP 3.25型		
水深(m)	283	285	286	287	285	289	286		289
走行距離(m)	327	1,726	604	1,088	528	1,008	46	5,327	843
観察面積(m ²)	576	3,038	1,062	1,915	930	1,774	80	9,376	1,484
									10,859



A : カメラの光軸距離, H : カメラの海底からの高さ, α : カメラの俯角
 B : 観察幅 β : 水平画角

図-3.2.7 ROVの画角と観察幅

2.3 餌生物と食物網

ズワイガニとその餌生物に関連する底生動物、動物プランクトン、植物プランクトンの指標となる水中の懸濁態有機物 (Particulate Organic Matter ; 以下, POM), および底質を炭素・窒素安定同位体比の分析試料とした (表-3.2.6)。

ズワイガニは、保護区 (20 検体) で 2007 年 7 月 10 日に、対照区 (13 検体) で 7 月 11 日に、かご網により採捕された 33 検体の第 1 脚および第 2 脚の筋肉組織を分取し、冷凍保存 (-20°C , 以下の試料も同様) した。

関連する餌生物は保護区内 (2007, 2010, および 2013 年に採取) において、採泥器 (スミス・マッキンタイヤ型; $1/20\text{m}^2$, 重鎮 10kg) により採取された, 多毛綱 Polychaeta (5 検体; 全量), 端脚目 Amphipoda (3 検体; 殻を除去した筋肉組織), および底質 (目視で夾雑物を取り除いたもの) を, 冷凍保存した。次に, かご網 (図-3.2.3 と同様) により採取された, エッチュウバイ *Buccinum striatissimum* (5 検体; 腹足の筋肉組織), ツバイ *Buccinum tsubai* (6 検体; 腹足の筋肉組織), モロトゲアカエビ *Pandalopsis japonica* (5 検体; 殻を除去した尾部の筋肉組織), キタクシノハクモヒトデ *Ophiura sarsii* (20 検体; 筋肉組織), およびアカガレイ *Hippoglossoides dubius* (15 検体; 筋肉組織) を, 冷凍保存した。さらに, かご網により採捕されたアカガレイの消化管内容物より出現したホタルイカ *Watasenia scintillans* (2 検体; 筋肉組織), ツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* (1 検体; 殻を除去した筋肉組織), およびハタハタ *Arctoscopus japonicus* (1 検体; 筋肉組織) を, 冷凍保存した。

POM はバンドーン採水器 (A 型 6L, 宮本理研工業社製) を用いて採取した。採水器は船上から投入し, 海底直上で停止させ採水を行った。採水後, 冷暗状態で分析室に搬入, 直ちにプランクトンネット地 ($250\mu\text{m}$ メッシュ) で濾過して, 動物プランクトンなどを除去した後, あらかじめ 450°C で 3 時間加熱処理をしたグラスファイバー濾紙 (GF/F47mm フィルター, Whatman 社製; 以下, グラスファイバー濾紙) で減圧濾過を行ったものを冷凍保存した。

以上の 13 試料を分析直前に解凍し, 60°C で 24 時間乾燥させ粉末処理したものを乾燥重量で約 1g 分取した。キタクシノハクモヒトデ, POM および底泥は 6N の塩酸を約 1mL 滴下し, 脱炭酸処理を行い錫コンテナーに入れた。残りの試料のうちツノナシオキアミおよび端脚目を除いた種類についてはクロロフィル: メタノール (2:1) 溶液に 24 時間浸し, 20 分間の遠心分離を 2 回繰り返して脱脂処理を行い錫コンテナーに入れた。炭素・窒素安定同位体比は, 元素分析計に質量分析計を組み合わせたシステムによって測定した。

炭素・窒素安定同位体比は, 捕食動物とその餌生物との関係を示唆する。海域では栄養段階が 1 つ上がると, 窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) は約 3.4‰, 炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は約 1‰上昇する (DeNiro and Epstein, 1978, 1981)。こ

れらに基づいて，食物網を解析した。

表-3.2.6 炭素・窒素安定同位体比分析に用いた試料と分析機器

試料			調査年	サンプリング 方法	分析部位	検体数	元素分析計	質量分析計	前処理
ズワイガニ	<i>Chionoecetes opilio</i>	雄(保護区)	2007年	籠網	脚の筋肉組織	10	EA1108, Fisons 社製	delta-S, Finnigan MAT 社製	脱脂
"		雌(保護区)	"	"	"	10	"	"	"
"		雄(対照区)	"	"	"	10	"	"	"
"		雌(対照区)	"	"	"	3	"	"	"
多毛綱	Polychaeta		2010年	採泥	全量	5	EA1500, Fisons 社製	DELTA plus Thermo Fisher Scientific 社製	"
エッチェウバイ	<i>Buccinum striatissimum</i>		2007年	籠網	腹足の筋肉組織	5	EA1108, Fisons 社製	delta-S, Finnigan MAT 社製	"
ツバイ	<i>Buccinum tsubai</i>		2010年	"	"	6	EA1500, Fisons 社製	DELTA plus Thermo Fisher Scientific 社製	"
ホタルイカ	<i>Watasenia scintillans</i>		2013年	アカガレイ 胃内容物	筋肉組織	2	"	"	"
ツノナシオキアミ	<i>Euphausia pacifica</i>		"	"	"	1	"	"	-
端脚目	Amphipoda		2010年	採泥	"	3	"	"	-
モロトゲアカエビ	<i>Pandalopsis japonica</i>		2007年	籠網	筋肉組織	5	EA1108, Fisons 社製	delta-S, Finnigan MAT 社製	脱脂
キタクシノハクモヒトデ	<i>Ophiura sarsii</i>		"	"	"	20	Flash EA1112, Thermo Fisher Scientific 社製	DELTA V, Thermo Fisher Scientific 社製	脱炭酸
アカガレイ	<i>Hippoglossoides dubius</i>		2013年	"	"	15	EA1500, Fisons 社製	DELTA plus Thermo Fisher Scientific 社製	脱脂
ハタハタ	<i>Arctoscopus japonicus</i>		"	アカガレイ 胃内容物	"	1	"	"	"
POM(懸濁態有機物)			2007年	採水後 フィルター濾過	フィルターサンプル	2	"	"	脱炭酸
底泥			"	採泥	全量	2	"	"	"

3. 結果

3.1 調査対象とした人工魚礁とその周辺の環境

保護区および対照区における観測時(2007年7月9日)の水温は、表層で23℃台、底層で1℃台と水深とともに低下した(図-3.3.1)。水深120~150m付近にかけて水温躍層がみられた。塩分は表層~下層まで33.3~34.1の範囲であった。水温・塩分ともに保護区と対照区の差はみられなかった。

底質粒度は、保護区および対照区ともに、シルト・粘土分がそれぞれ50%近くを占めていた(表-3.3.1)。中央粒径は、保護区が0.0047mm、対照区では0.0051mmであった。CODは、保護区で23.8mg/g乾泥、対照区で20.6mg/g乾泥であり、両地点とも水産用水基準(2012)の富栄養海域に相当した。強熱減量は、保護区では12.0%、対照区では11.5%であった。保護区のみで測定したクロロフィルaは、9.37 μ g/g乾泥であった。

底生動物として出現した分類群数は、保護区で11種、対照区では12種であり、個体数はいずれも0.1m²当たり14個体であった(表-3.3.2)。出現した分類群は、保護区、対照区ともに、原索動物門の有孔虫目Foraminiferaや棘皮動物門のクモヒトデ綱(蛇尾綱)Ophiuroidea、環形動物門の多毛綱Polychaeta、節足動物門の端脚目Amphipoda、および軟体動物門Molluscaなどであった。

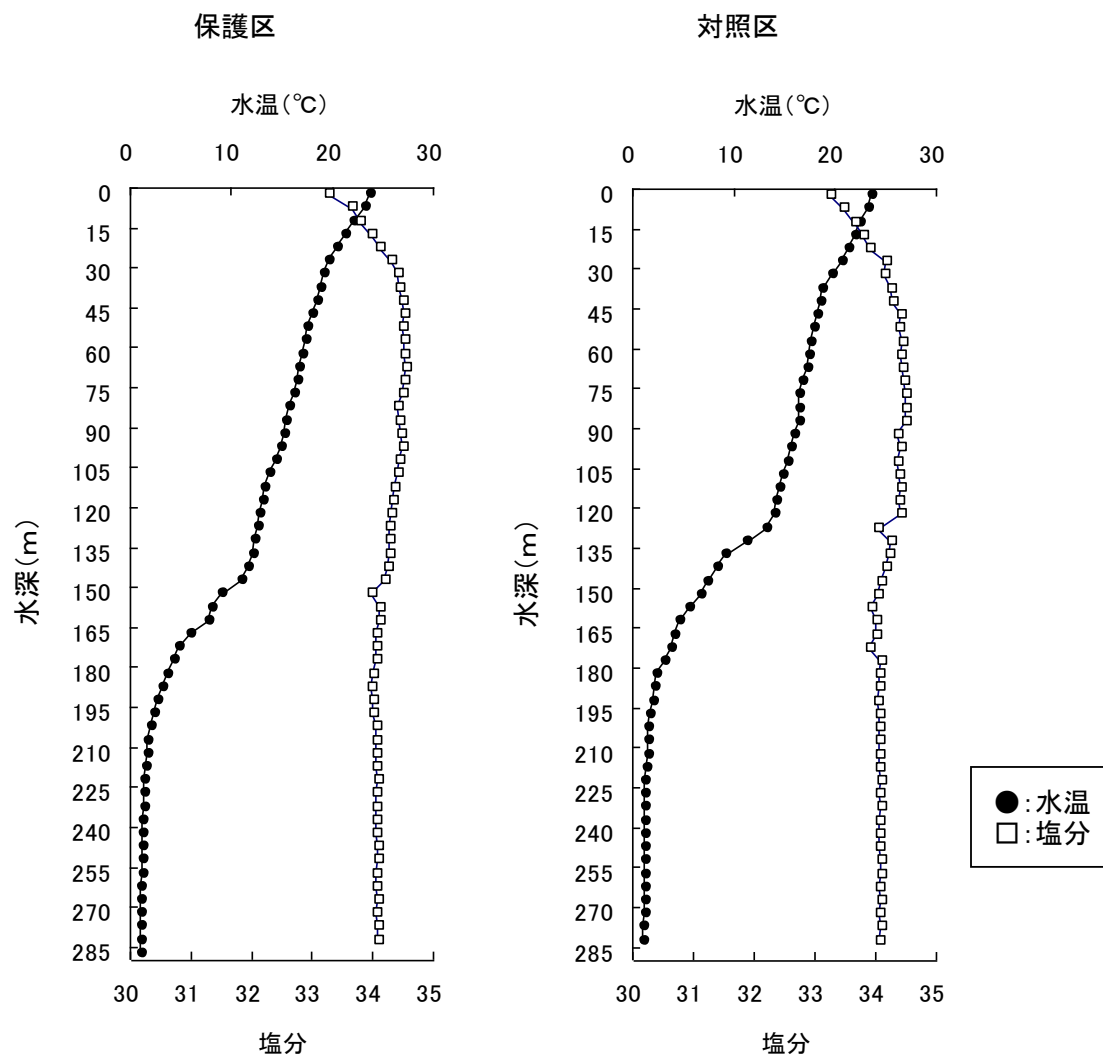


図-3.3.1 水質の鉛直分布

表-3.3.1 底質

分析項目		保護区	対照区
粒 度 組 成 (%)	粗砂分 (0.85-2mm)	0.0	0.0
	中砂分 (0.250-0.85mm)	0.3	0.5
	細砂分 (0.075-0.250mm)	0.5	0.7
	シルト分 (0.005-0.075mm)	47.7	49.1
	粘土分 (0.005mm未満)	51.5	49.7
中央粒径 (mm)		0.0047	0.0051
COD (mg/g乾泥)		23.8	20.6
強熱減量 (%)		12.0	11.5
クロロフィルa (μg/g乾泥)		9.37	—

表-3.3.2 底生動物の出現状況

No.	門	綱	目	科	分類群名	保護区		対照区	
						個体数	湿重量	個体数	湿重量
1	原生動物	根	足虫	有孔虫	シラガイ	<i>Pyrgo</i> sp.		1 (7.1)	0.001 (0.0)
2					ジュスハリガイ	<i>Robulus</i> sp.	2 (14.3) 0.004 (0.8)	3 (21.4) 0.006 (0.3)	
3	環形動物	多	毛	遊在	カギコガイ	<i>Sigambra</i> sp.		1 (7.1)	0.004 (0.2)
4					ナナイソメ	<i>Onuphis imajimai</i>	1 (7.1) 0.176 (34.0)	1 (7.1)	0.071 (3.5)
5					ギボシソメ	<i>Paraninoe simpla</i>		1 (7.1)	0.024 (1.2)
6			定在		スピオ	<i>Laonice</i> sp.		1 (7.1)	0.375 (18.7)
7					ミスヒキコガイ	<i>Tharyx</i> sp.	2 (14.3) 0.013 (2.5)		
8					タケフシコガイ	<i>Praxillella gracilis</i>	1 (7.1) 0.134 (25.9)		
9						<i>Praxillella pacifica</i>		1 (7.1)	0.001 (0.0)
10					チマキコガイ	<i>Myriochele heeri</i>	1 (7.1) 0.003 (0.6)		
11					タマシツサコガイ	<i>Terebellides</i> sp.		1 (7.1)	0.002 (0.1)
12	軟体動物	尾	腔		カハタウミヒメ	<i>Chaetoderma</i> sp.	1 (7.1) 0.026 (5.0)		
13		腹	足	新腹足	エゾハiei	<i>Mohnia</i> sp.	1 (7.1) 0.153 (29.5)		
14		二枚貝	マルスタレガイ	ハカガイ		<i>Raetellops pulchella</i>	1 (7.1) 0.004 (0.8)		
15	節足動物	甲	殻	端脚	Pardaliscidae	Pardaliscidae	2 (14.3) 0.002 (0.4)		
16					イシヨコエビ	Isaeidae	1 (7.1) 0.002 (0.4)		
17	棘皮動物	蛇	尾	顎蛇尾	スナクモヒトデ	<i>Amphiura</i> sp.		2 (14.3)	1.118 (55.7)
18				唇蛇尾	クモヒトデ	<i>Ophiura leptoctenia</i>		1 (7.1)	0.044 (2.2)
19	原索動物	擬	索	腸鰓		Enteropneusta		1 (7.1)	0.360 (17.9)
20		尾	索	壁性	モルグウ	Molgulidae	1 (7.1) 0.001 (0.2)		
21					egg mass			-	+
種類数						11		12	
合 計						14 (100.0) 0.518 (100.0)		14 (100.0) 2.006 (100.0)	

注) 個体数の-は計数不能を, 湿重量の+は0.001g未満を示す。カッコ付き数値は組成比率を示す。

3.2 保護効果と魚介類の蛸集状況

ズワイガニ保護効果（保護区と対照区の生息密度・成熟） カゴ網によって採捕された、保護区と対照区のズワイガニの個体数を表-3.3.3 に示した。保護区では 20 カゴで 212 個体（雄 24 個体，雌 188 個体），対照区では揚網中に 1 カゴが脱落したため，19 カゴで 40 個体（雄 37 個体，雌 3 個体）であった。1 カゴあたりの雌雄別の平均採捕個体数を比較すると，保護区では雄が 1.2 個体/カゴ，雌が 9.4 個体/カゴに対し，対照区では雄が 1.9 個体/カゴ，雌が 0.2 個体/カゴであり，雄は保護区と対照区において CPUE 値は有意に異ならなかった（ t 検定， $P>0.05$ ）。一方，雌は有意に異なり，保護区が対照区の 47 倍となった（ t 検定， $P<0.001$ ）。

次に，保護区と対照区におけるズワイガニ雄の甲幅組成を図-3.3.2 に示した。保護区の雄では，甲幅 90mm 以上の最終脱皮を終えた成体（未成体は 1 個体のみ）がほとんどであった。一方，対照区では甲幅 90mm 未満の個体もみられ，未成体の割合が 50%以上を占めた。雌は，保護区で 188 個体が採捕され，甲幅は 70～80mm 前後の個体が多く，全てが成体の抱卵個体であった（図-3.3.3）。一方，対照区では 3 個体が採捕され，2 個体が成体の抱卵個体，1 個体は未成体であった。

ROV により観察された，保護区 7 回（観察面積 9,376 m²）と対照区 1 回（観察面積 1,484 m²）における，ズワイガニの個体数と生息密度（個体/1,000 m²）を表-3.3.4 に示した。ズワイガニは，保護区で 93 個体，対照区で 7 個体の合計 100 個体が観察された。ズワイガニの平均生息密度は保護区では 9.9 個体/1,000 m²，対照区では 4.7 個体/1,000 m²と保護区が対照区の 2.1 倍を示した。また，映像からは雌雄の判別は可能な場合とそうでない場合があったが，雌雄が判別された個体については雌の割合が多かった。

魚介類の蛸集状況 ROV による保護区内（9,376 m²）の探査で，魚礁単体 3 基が観察された。ROV の画像から，出現した魚介類の魚礁単体からの距離別の生息密度（個体/1,000 m²）を表-3.3.5 に示した。ズワイガニは，魚礁単体内で 42.3 個体/1,000 m²となった。これは確認された 3 基のうち 1 基の魚礁単体直下に，蛸集（定位）した雄の成体（映像から判断）が 3 個体観察されたためである（図-3.3.4）。ズワイガニ以外では甲殻綱の十脚目 Decapoda（エビ類），イソギンチャク目 Actiniaria や，軟体動物門ではエゾバイ科 Buccinidae が魚礁単体内で生息密度が高かった。さらに，棘皮動物の蛇尾綱 Ophiurida（クモヒトデ類）や海百合綱 Crinoidea（ウミシダ類）は，魚礁単体内と魚礁単体近傍のみの観察ではあるが，魚礁単体内で観察された。

また，ズワイガニの映像から，産卵中の雌（図-3.3.5），多毛綱 Polychaeta を捕食する雄（図-3.3.6），ウミシダ類やダーリヤイソギンチャク *Liponema*

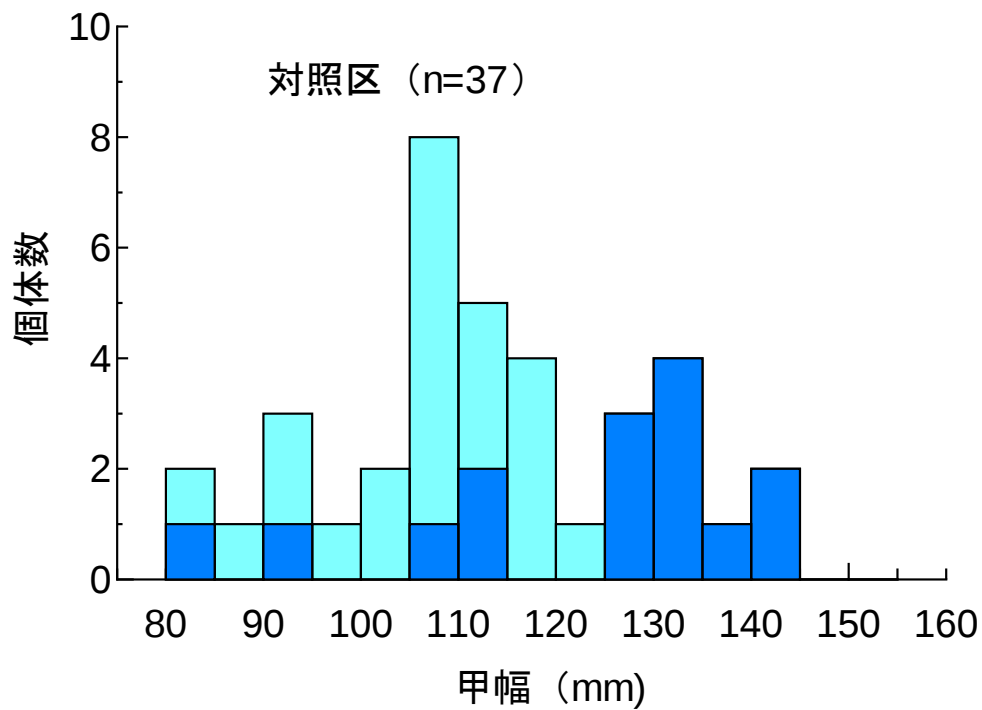
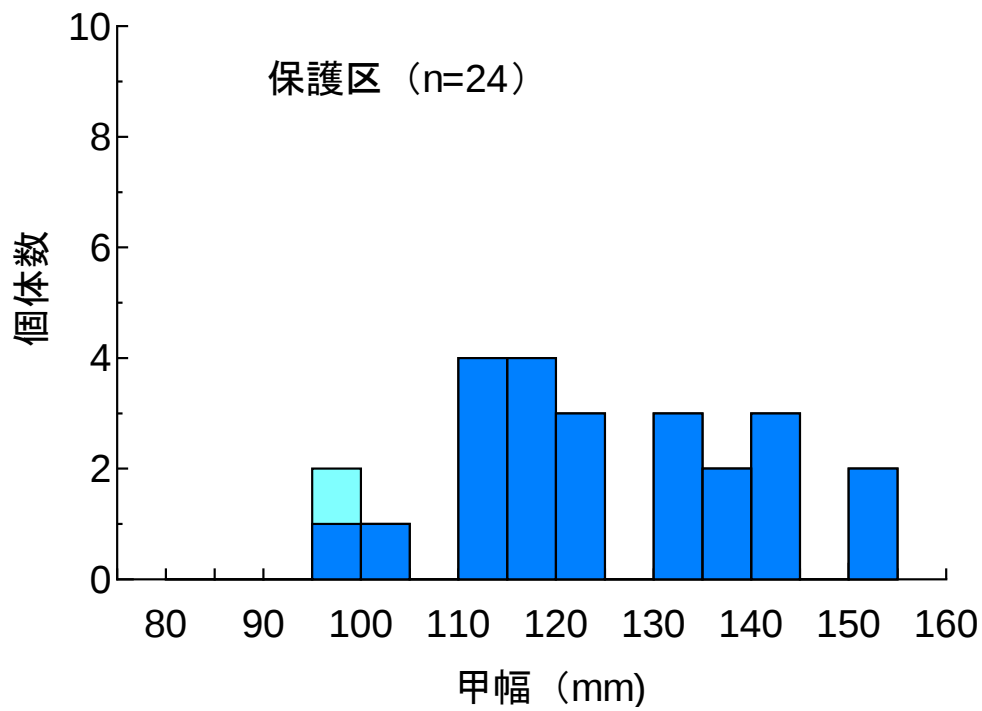
multicornis に甲殻後縁部を接近させる個体 (図-3.3.7, 図-3.3.8), およびズワイガニ 13 個体が集団を形成する様子などが確認された (図-3.3.9)。

ズワイガニ以外では, マダラ *Gadus macrocephalus* が魚礁単体内のみで観察された (図-3.3.10)。また, 魚礁単体表面に生息するエゾバイ類や (図-3.3.11), 魚礁単体の潮下側に動物プランクトンのスウォームが形成されていることが確認された (図-3.3.12)。

表-3.3.3 カゴ網によるズワイガニの採捕個体数

カゴNo	保護区			対照区		
	雄	雌	合計	雄	雌	合計
1	4	10	14	3	0	3
2	1	17	18	3	0	3
3	1	26	27	3	0	3
4	2	13	15	3	0	3
5	0	5	5	1	0	1
6	1	6	7	5	0	5
7	2	15	17	0	0	0
8	0	5	5	3	0	3
9	0	7	7	1	0	1
10	0	7	7	3	0	3
11	1	14	15	2	1	3
12	0	6	6	—	—	—
13	2	16	18	0	0	0
14	2	5	7	0	0	0
15	1	7	8	1	1	2
16	1	3	4	2	1	3
17	1	5	6	1	0	1
18	0	3	3	2	0	2
19	2	6	8	1	0	1
20	3	12	15	3	0	3
計	24	188	212	37	3	40

注) 対照区のNo.12は揚網時に脱落し、19カゴとなった。



最終脱皮前 最終脱皮後

図-3.3.2 雄の甲幅組成

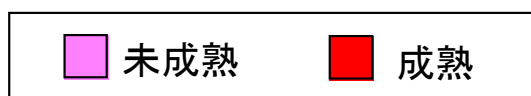
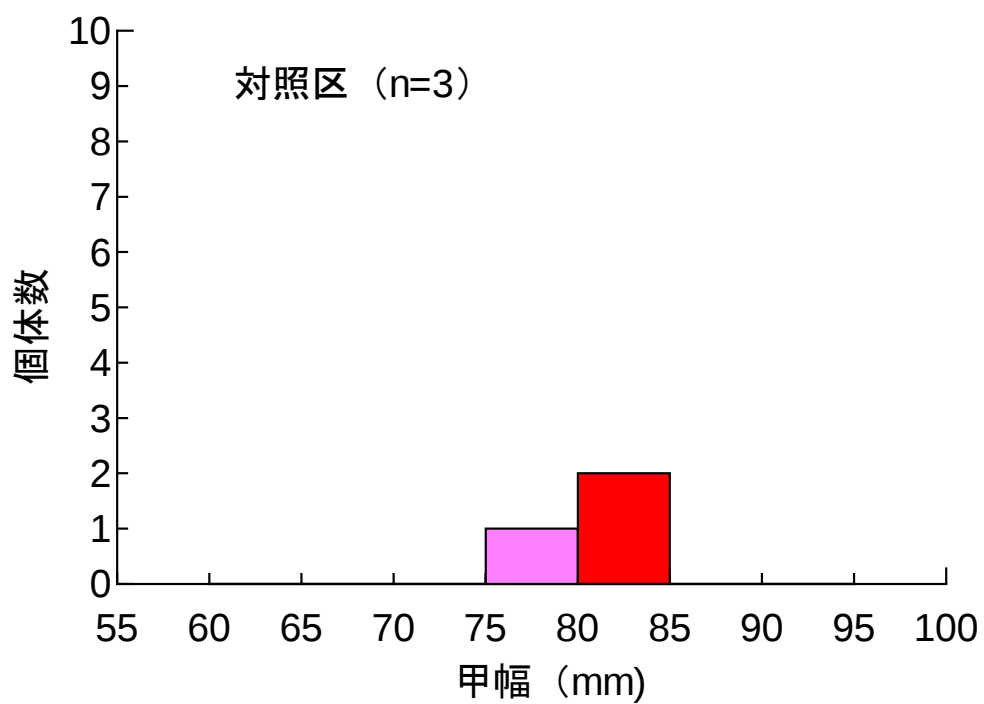
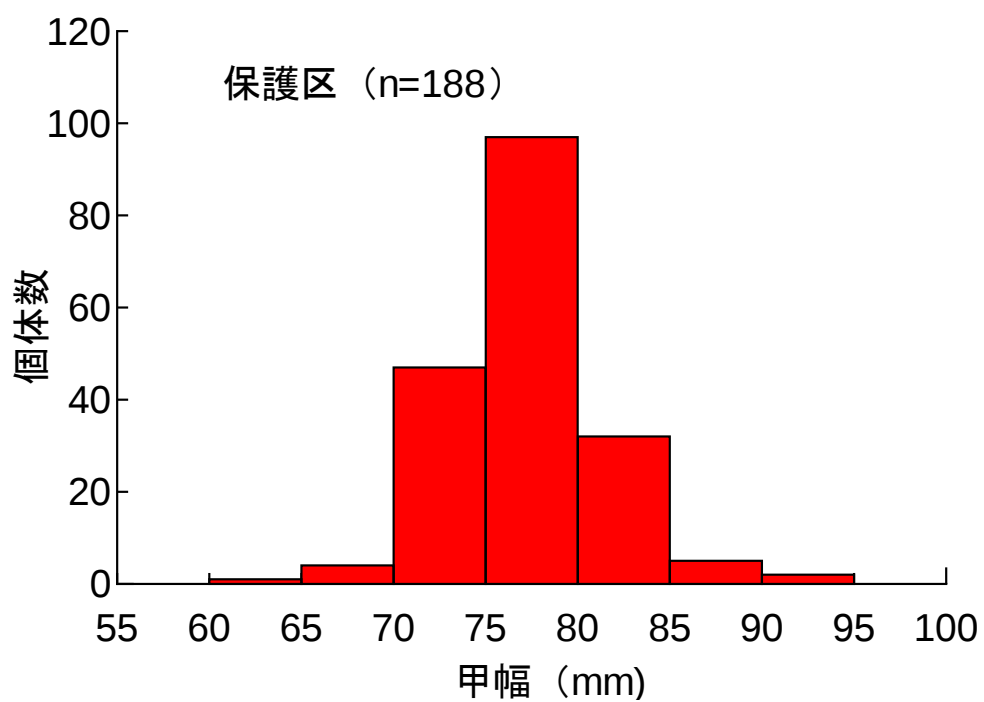


図-3.3.3 雌の甲幅組成

表-3. 3. 4 ROV で観察されたズワイガニの個体数と生息密度

	個体数	観察面積(m ²)	密度(個体/1,000m ²)
保護区	93	9,376	9.9
対照区	7	1,484	4.7

表-3. 3. 5 保護区内で ROV により観察された魚介類の生息密度

		単位:個体/1,000m ²		
分類群名		魚礁単体礁内 (<0.5m)	魚礁単体近傍 (0.5~5m)	その他 (>5m)
腔腸動物門				
イソギンチャク目	Actiniaria	56.4	0	6.6
軟体動物門				
エゾバイ科	Buccinidae	1848.3	80.5	4.3
節足動物門				
ズワイガニ	<i>Chionoecetes opilio</i>	42.3	0	9.9
十脚目(エビ類)	Decapoda	846.6	5.4	7.7
棘皮動物門				
蛇尾綱(クモヒトデ類)	Ophiurida	3668.4	241.4	—
海百合綱(ウミシダ類)	Crinoidea	3470.9	16.1	—
脊椎動物門(硬骨魚綱)				
カレイ目	Pleuronectiformes	0	0	2.6
ゲンゲ科	Zoarcidae	0	16.1	51.6
マダラ	<i>Gadus macrocephalus</i>	84.7	0	0

注) 1.魚礁単体内は魚礁単体表面および直下から0.5mの海底を示す。

2.カッコ内の数値は魚礁単体からの水平距離を示す。

3.「-」は、計数の未実施を示す。



図-3.3.4 魚礁単体直下に蛸集（定位）
するズワイガニ雄



図-3.3.5 産卵中のズワイガニ雌



図-3.3.6 多毛類を捕食するズワイガニ雄



図-3.3.7 ウミシダに甲殻後縁部を
近接させるズワイガニ



図-3.3.8 ダーリアイソギンチャクに甲殻後縁部を
近接させるズワイガニ



図-3.3.9 保護区内で観察された集団のズワイガニ



図-3.3.10 魚礁単体内で定位するマダラ

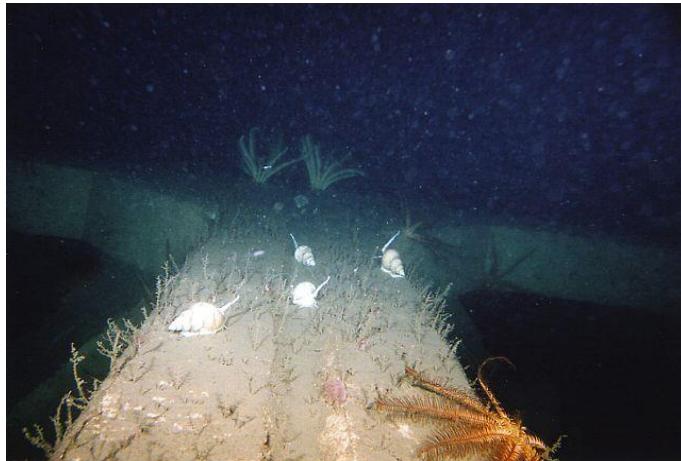


図-3.3.11 魚礁単体表面に付着するエゾバイ類

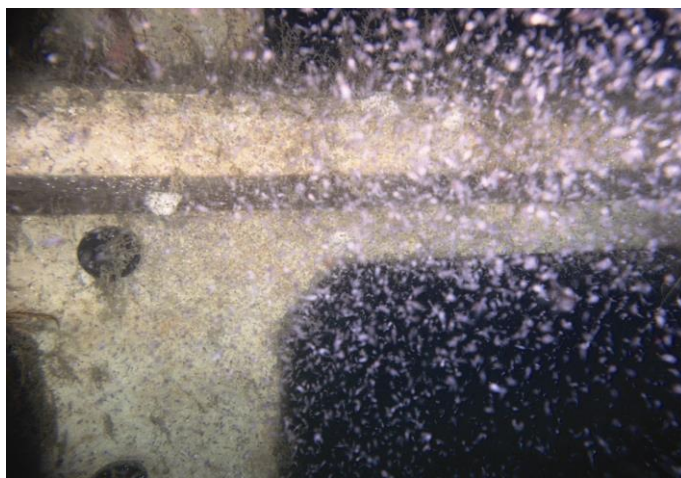


図-3.3.12 魚礁単体内の動物プランクトンのスウォーム

3.3 餌生物と食物網

ズワイガニと関連する餌生物の炭素・窒素安定同位体比の平均値と標準偏差を表-3.3.6 に示した。ズワイガニの $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の平均値は、保護区内の雄は -16.32‰ と 13.27‰ で、雌は -17.09‰ と 12.68‰ であった。一方、対照区の雄は -16.36‰ と 12.97‰ で、雌は -17.03‰ と 12.53‰ であった。ズワイガニは雌雄ともに保護区と対照区での違いによる有意差はみられなかった (t 検定, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ともに $P > 0.05$)。一方、雌雄間では保護区、対照区とも有意差がみられた (t 検定, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ともに $P < 0.05$)。

ズワイガニ雄（保護区）の餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ と、ズワイガニ雌（保護区）の餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を DeNiro and Epstein (1978, 1981) に基づいて推定すると、それぞれ -17.32‰ , 9.87‰ と -18.09‰ , 9.28‰ となる。この餌生物の位置を $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ上で見るとキタクシノハクモヒトデ (-17.65‰ , 10.84‰)、アカガレイ (-18.28‰ , 10.86) および標準偏差は大きいが多毛綱 (-18.44‰ , 11.99‰) 位置した (図-3.3.13)。また、若干餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ としては高めではあるが、端脚目 (-19.26‰ , 11.81‰) およびモロトゲアカエビ (-16.54‰ , 12.14‰) が位置した。これらのさらに一段階下にはツノナシオキアミ (-20.77‰ , 6.84‰)、底質 (-20.20‰ , 5.64‰) が位置した。さらに、ズワイガニのやや上位にはエッチュウバイ (-15.50‰ , 13.94‰)、ツバイ (-16.65‰ , 14.27‰) などのバイ類が位置した。

表-3.3.6 ズワイガニと関連する餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の平均値 (‰) と標準偏差

分類群名			$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		検体数
			平均値	± 標準偏差	平均値	± 標準偏差	
ズワイガニ	<i>Chionoecetes opilio</i>	雄(保護区)	-16.32	± 0.37	13.27	± 0.42	10
"		雌(保護区)	-17.09	± 0.14	12.68	± 0.17	10
"		雄(対照区)	-16.36	± 0.22	12.97	± 0.27	10
"		雌(対照区)	-17.03	± 0.25	12.53	± 0.31	3
多毛綱	Polychaeta		-18.44	± 0.66	11.99	± 2.79	5
エッチュウバイ	<i>Buccinum striatissimum</i>		-15.50	± 0.44	13.94	± 0.31	5
ツバイ	<i>Buccinum tsubai</i>		-16.65	± 0.30	14.27	± 0.44	6
ホタルイカ	<i>Watasenia scintillans</i>		-20.09		9.95		2
ツノナシオキアミ	<i>Euphausia pacifica</i>		-20.77		6.84		1
端脚目	Amphipoda		-19.26	± 0.63	11.81	± 0.63	3
モロトゲアカエビ	<i>Pandalopsis japonica</i>		-16.54	± 0.21	12.14	± 0.29	5
キタクシノハクモヒトデ	<i>Ophiura sarsii</i>		-17.65	± 0.27	10.84	± 0.53	20
アカガレイ	<i>Hippoglossoides dubius</i>		-18.28	± 0.13	10.86	± 0.22	15
ハタハタ	<i>Arctoscopus japonicus</i>		-22.13		10.40		1
POM(懸濁態有機物)			-26.16	± 0.50	6.76	± 0.08	2
底質			-20.20	± 0.56	5.64	± 0.24	2

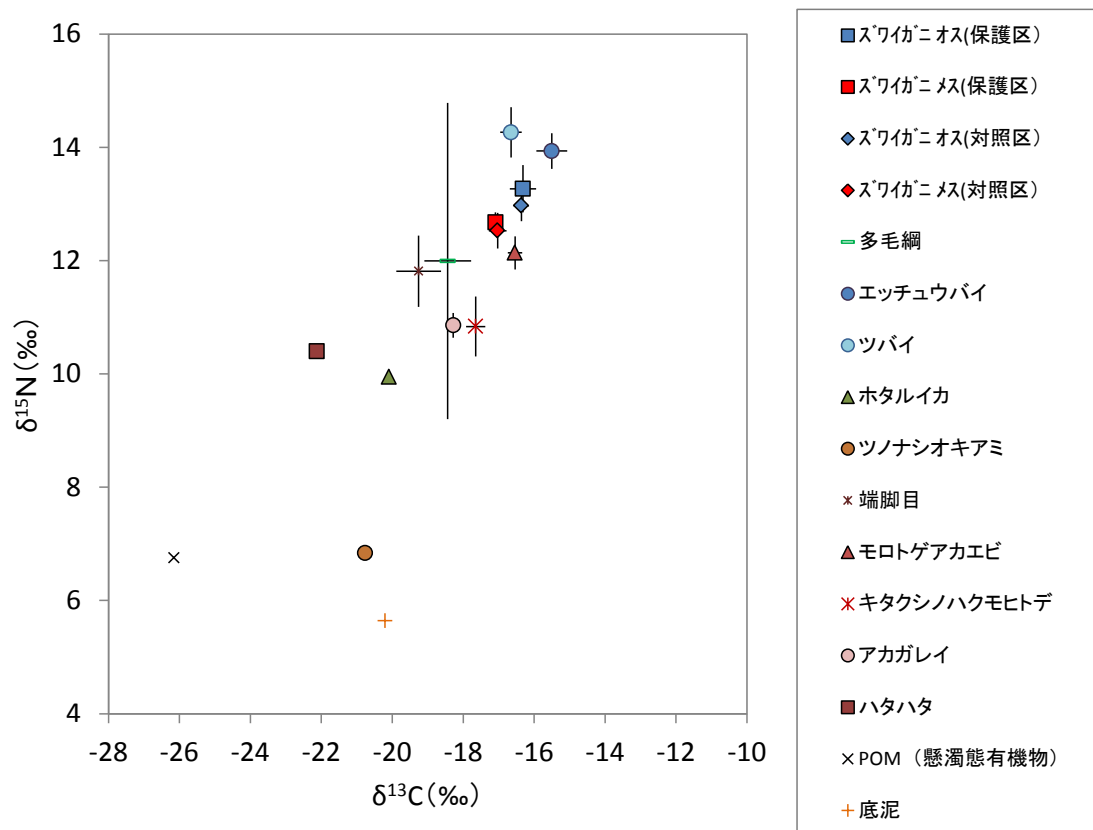


図-3.3.13 スワイガニと関連する餌生物の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ(平均±標準偏差)

4. 考察

本研究を行った 2007 年 7 月 9 日の保護区および対照区の水温は、表層で 23℃ 台、底層で 1℃ 台と水深とともに低下した（図-3.3.1）。塩分は表層から下層まで 33.3～34.1 と大きな変化はみられなかった。日本海は年間を通じて水温・塩分などにほとんど変化の見られない「日本海固有水」が存在し、「日本海固有水」は深層で 1℃ 前後、塩分 34.1 以下とされており（海洋利用の手引き-日本海編, 1997）、本研究を行った兵庫県津居山沖の保護区の設置されている海底は「日本海固有水」の中に位置していた。

ROV 調査によるズワイガニなどの生息密度推定 深海域における表在性メガロベントス（魚類、甲殻類、棘皮動物など）の生息密度の推定は、これまで「しんかい 2000」、ROV、および曳航式ビデオカメラなどによって実施されている。照明光を用いて観察している「しんかい 2000」や ROV において、これらの接近に対して生物の行動変化は少ないことが報告されている（橋本, 1985；小林ら, 1991, Adams PB, 1995）。また、曳航式ビデオカメラや水中スチルカメラを用いてズワイガニの生息密度を推定した研究においても、水中ライトやストロボ光の影響が少ないことが示唆されている（Miller RJ, 1975；渡部ら, 2001；Watanabe, T, 2002）。今回の現地観察時においても、ズワイガニの一部では、ROV の接近に対して回避する行動が認められたが、いずれも、水中ビデオカメラの視野に入った後にゆっくり移動を開始していた。このことから、ROV の接近や照明光により影響を受ける前に、ズワイガニを観察することができたものと仮定した。

ズワイガニの保護・蛸集機能 本研究では ROV によりズワイガニの生息密度の比較を行うとともに、カゴ網による採捕調査を実施した。ROV による生息密度では、保護区で 9.9 個体/1,000 m²、対照区で 4.7 個体/1,000 m²と、保護区が対照区の 2.1 倍であった（表-3.3.4）。この結果を、他海域の本研究と同程度の水深で行われた「しんかい 2000」や曳航式ビデオカメラによる生息密度と比べると、他海域では 0.3～10 個体/1,000 m²の範囲であった（表-3.4.1）。行われた 13 回の平均生息密度は 4.5 個体/1,000 m²であり、保護区は 9.9 個体/1,000 m²と高い生息密度であった。一方、対照区では 4.7 個体/1,000 m²で他海域での平均的な値と同程度であった。また、カゴ網による採捕では、保護区で 212 個体（20 カゴ）が採捕された（表-3.3.3）。一方、対照区では 40 個体（19 カゴ）が採捕された。1 カゴあたりの雌雄別の平均採捕個体数を比較すると、保護区では雄が 1.2 個体/カゴ、雌が 9.4 個体/カゴに対し、対照区では雄が 1.9 個体/カゴ、雌が 0.2 個体/カゴであり、雄は保護区と対照区において同水準なのに対し（*t* 検

定, $P > 0.05$), 雌は保護区が対照区の 47 倍と有意に異なった (t 検定, $P < 0.001$)。カゴ網による採捕から生息密度として定量的な評価をすることは出来ないが, 同時期に同一地点において, 二種類の異なる調査方法によって保護区のズワイガニ保護機能が確認された。

また, 本研究で対象とした保護区は保護区内部を沖合底曳網漁業の操業禁止区域として設定し, ズワイガニを漁獲から保護している。さらに, ズワイガニ資源を守るため兵庫県と鳥取県の沖合底曳網漁業者が協定を結び, 底曳網漁業が開始される 9 月 1 日からズワイガニ漁業が解禁となる 11 月 5 日までの間, 底曳網漁業によるズワイガニ漁業時期以外の混獲を防ぐために保護区周辺 1 マイルを操業禁止とすることで自主協定が結ばれている。ズワイガニ操業解禁日前日の 11 月 5 日の深夜, 解禁直後の操業を行うため保護区周辺に集まっている底曳網漁船 (かけ廻わし) の航跡状況と, 翌 11 月 6 日の 0 時過ぎの底曳網の操業状況を示した航跡図である (図-3.4.1)。この航跡図からも分かるように, 保護区周辺は操業解禁日当日に多くの漁船が利用している操業実態があり, 保護区から染み出した資源を利用していた。

保護区における ROV 観察時に, ズワイガニ雄の成体 3 個体が魚礁単体直下に蛸集 (定位) している状況が, 目視観察調査が行われて以来はじめて観察された (図-3.3.4)。これらのうち 2 個体は甲殻後縁部を, 魚礁単体の梁に近接させた状態で確認され, ROV の接近に対してもしばらく動かなかった。また, 魚礁単体内ではダーリヤイソギンチャクやウミシダ類に対して同様に定位する姿が, しばしば確認されるとともに (図-3.3.7, 図-3.3.8), ズワイガニ 13 個体が集団を形成する様子が確認された (図-3.3.9)。ズワイガニが鳥取県沖合の水深 220 ~ 240m の海域においても雌の未成熟および成熟個体がイソギンチャク類の側近で甲殻後縁部を接するような姿勢で定位する様子が観察されている (小林ら, 1991)。また, 平坦な海底に石や木片があるとその周りにいることが観察されている (今ら, 1997)。さらに, 大きな水槽内で飼育すると壁に背を向けていることが多いとされている (今ら, 1997)。従って, ズワイガニはダーリヤイソギンチャクやウミシダ類などに寄り添う走触性を有しており, 魚礁単体をこれにみたてて蛸集したものと推察された。

以上のことから, 保護区設置によるズワイガニ保護効果に加え, 魚礁単体がズワイガニに対して蛸集機能を有することが示唆された。

ズワイガニの増殖機能 「しんかい 2000」による, 日本海西部の水深 220 ~ 270m に設置された保護区の観察事例では, 設置後 1 年では付着生物は視認されず, 魚礁単体内部にスケトウダラ 1 個体が確認されている (金丸ら, 1992 ; 今, 1969)。6 年後にはイソギンチャク類, およびウミシダ類の付着が確認されてい

る（山崎，1991）。さらに，13 年以上経過すると底面梁部にイソギンチャク類，ウミシダ類，およびバイ類が確認され，周囲ではキュウリエソ，エビ類，およびヤドカリ類の蛸集が見られる（小林，1991）。

一方，ズワイガニの食性について，消化管内容物の出現結果から，11 綱 14 目 30 種の動物と 3 種の植物が報告されており，主要な分類群はクモヒトデ類，甲殻綱，および二枚貝類であり。さらに，その他魚類，イカ類，多毛綱等とされている（安田，1967）。

本研究において，ROV によって確認された保護区および周辺の観察結果から，魚礁単体から 5m 以内の範囲では，ズワイガニやクモヒトデ類をはじめとする底生動物が多く分布しているとともに（図-3.3.10，図-3.3.11），動物プランクトンのスウォームが確認された（図-3.3.12）。魚礁単体直近で観察された魚介類は，付着動物，底生動物，魚類，および動物プランクトンに大別された（表-3.3.5）。津居山沖の保護区は設置後 11 年から 13 年が経過しており，既往の知見と同様の傾向が示された。保護区によって創出される空間に，多様な生物が生息し，これらは食物網を通じて相互に関係しながら，保護区を中心に新たな生態系が形成されているものと推察された。

ズワイガニに対する保護区の餌場機能の検討を行った。保護区内の底質は有機物（COD 23.8mg/g 乾泥，強熱減量 12.0）に富み，クロロフィル a（ $9.37 \mu\text{g/g}$ 乾泥）も高いことから（表-3.3.1），プランクトンやデトリタスなどが沈降したものと推察され，このことは，底質の有機物を基点とした腐食連鎖上の動物にとっては，比較的餌料環境が良好なものと考えられた。さらに，ROV の観察により多毛類などの餌生物を摂餌していることが明らかとなった（図-3.3.6）。

次に，ズワイガニの筋肉の炭素・窒素安定同位体比を用いて，ズワイガニの食物網を解析した（表-3.3.6 および図-3.3.13）。ズワイガニはキタクシノハクモヒトデ，多毛綱およびアカガレイを餌生物としていた。さらに，若干高めであるが端脚目およびモロトゲアカエビを餌生物として利用していると推察された。また，餌生物のさらに一段階下にはツノナシオキアミ，底質が分布し，底泥の有機物を基点とした底生生態系に属すると判断され，底質の有機物からズワイガニまでは栄養段階で 2 段階程度上位に位置するものと推察された。また，ズワイガニは保護区，対照区ともに，雌雄間で炭素・窒素の安定同位体比に差がみられた。ズワイガニの雌雄間には餌料系列に違いが伺われ，生息環境（餌生物）の異なった海域で生息した履歴を持つことが示唆された。ズワイガニは水深 260～300m を境にして，浅い水深帯には雌ガニが，深い水深帯域には雄ガニが卓越して分布しているとされており（桑原ら，1995），これらを裏付ける知見が本研究で用いた安定同位体解析の結果からも得られた。

次に，保護区におけるズワイガニの産卵場機能の検討を行った。カゴ網によ

り保護区では 212 個体（雄 24 個体，雌 188 個体）が採捕された（表-3.3.3）。保護区の雄では甲幅 90mm 以上の最終脱皮を終えた成体がほとんどであった（図-3.3.2）。雌は，甲幅 70～80mm 前後の個体が多く，全てが抱卵個体であった（図-3.3.3）。このように保護区には成熟したズワイガニ雌雄が生息するとともに，ROV の観察時に保護区内において産卵を行っていることが確認された（図-3.3.5）。

以上の結果から，保護区にはズワイガニの漁獲からの保護効果および魚礁単体の設置による蛸集効果が確認された。また，保護区の造成によって保護された資源から染み出した資源を漁獲として利用しており，資源保護と持続的漁業の両立を目指す日本型の海洋保護区としての役割を果たしていると考えられた。さらに，保護区内に出現した雌は全てが抱卵個体であり，これら保護された雌ガニが産卵していたことが確認されたことから，保護区がズワイガニにとって産卵場としての増殖機能をもつことが明らかになるとともに，ズワイガニを含む魚介類の生息空間の創出や底生動物を基点とした餌場としての増殖効果が備わっていることが明らかとなった。

表-3. 4. 1 日本海西部他地点におけるズワイガニの生息密度

調査地点	緯度経度		水深 (m)	生息密度 (個体/1,000m ²)	出典
	北緯	東経			
富山湾	37° 20′	137° 32′	266-290	5.1	橋本, 堀田(1985)
若狭湾	35° 52′	135° 43′	232-237	5.2	領家(1991)
日御碕沖	35° 48′	132° 23′	254-259	5.6	金丸, 安達(1992)
加賀沖	36° 42′	136° 43′	228-242	0.3	大橋(1993)
越前岬沖	35° 56′	135° 40′	230-260	5.5	森山(2011)
隠岐諸島沖	36° 18′	132° 43′	295-335	1.0	渡部(2001)
隠岐諸島沖	36° 18′	132° 43′	285-287	4.0	〃
隠岐諸島沖	36° 23′	132° 47′	250-255	3.1	〃
隠岐諸島沖	36° 54′	132° 49′	274-279	3.0	〃
隠岐諸島沖	37° 03′	132° 47′	308-314	6.4	〃
隠岐諸島沖	36° 50′	133° 05′	257-260	10.0	〃
隠岐諸島沖	36° 46′	133° 11′	245-267	5.6	〃
隠岐諸島沖	36° 35′	133° 12′	207-208	3.0	〃

注) 越前岬沖の生息密度は4ヵ年の平均値

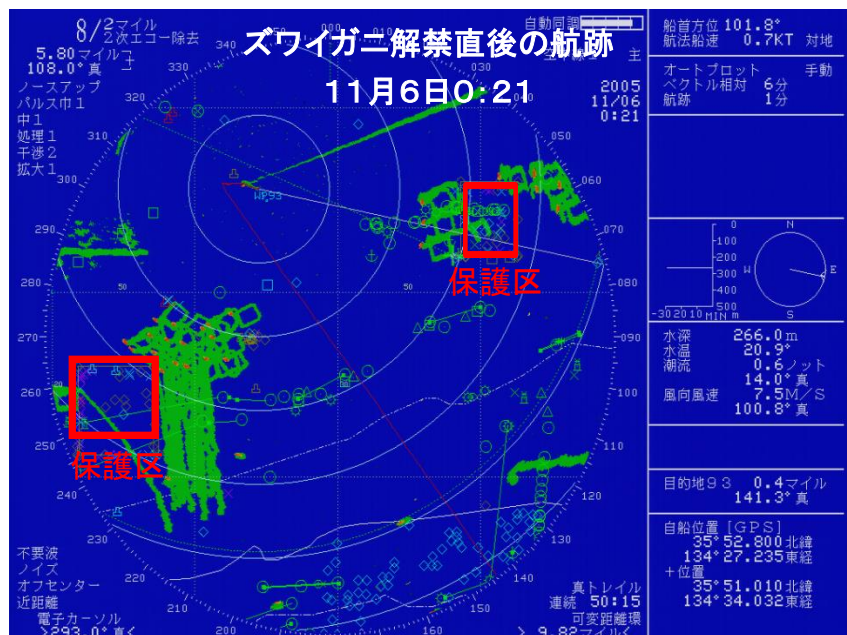
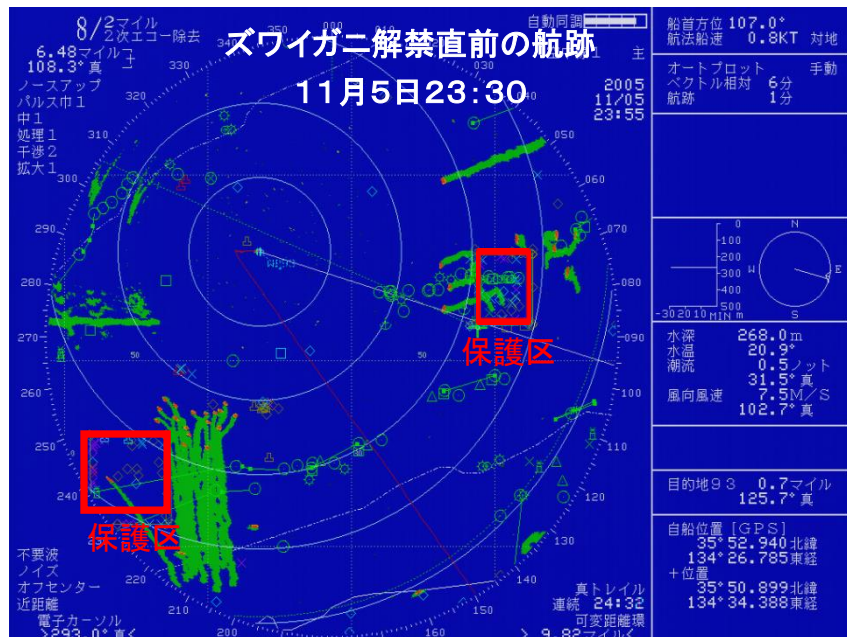


図-3.4.1 ズワイガニ保護区における底曳網漁船の航跡および操業状況

出典：兵庫県立農林水産技術総合センター但馬水産技術センター

第4章 総合考察

我が国の沿岸には、浅海域から深海域に至る海底に人工魚礁が多数設置されている。従来から行われている人工魚礁の機能評価は、潜水目視観察や採捕調査、人工魚礁周辺での対象とする魚介類の消化管内容物による摂餌解析など、短期的な調査による効果判定が行われてきたことから、さらなる効果の検証には、人工魚礁を生態系の視点から捉えることが課題であった。

そこで本研究では、従来から行われてきた調査手法に加え、計量魚群探知機による人工魚礁周辺域を含む広域的な蛸集量の定量化、超音波バイオテレメリー（以下、発信機）による対象とした魚介類の行動の連続追跡、また、操作性能が向上した自航式水中ビデオカメラ（Remotely operated vehicle；以下、ROV）による観察を組み合わせることにより、人工魚礁のもつ蛸集機能を長期的視点で捉えた。さらに、対象とした魚介類の消化管内容物による摂餌解析に加え、人工魚礁周辺に出現した餌生物と考えられる動物群との炭素と窒素の安定同位体比分析手法を導入して、対象とする魚介類と主な餌生物をめぐる生態系構造（食物網）の一部を明らかにした。

そして、人工魚礁の蛸集と増殖機能を評価するための調査手法の有効性を検証し、そのうえで、人工魚礁の調査手法や効果判定手法、さらに、人工魚礁の効果を持続的に発揮させるための造成漁場の利用管理について考えた。

研究の対象とした種は、極浅海域に設置された人工魚礁では底魚類であるマコガレイ *Pseudopleuronectes yokohamae*、水深 45m 付近に設置された高層型の人工魚礁では多獲性浮魚類であるマアジ *Trachurus japonicus*、さらに水深 300m の深海域に設置された人工魚礁では底生の大型ベントスであるズワイガニ *Chionoecetes opilio* であり、これら 3 種についての研究成果を以下に示す。

【マコガレイ稚魚の蛸集機能と餌料供給による増殖機能】

岡山県日生町沿岸の水深約 5m に設置された人工魚礁では、マコガレイ稚魚の分布や成長を把握した。また、マコガレイ稚魚の消化管内容物と人工魚礁周辺に生息する動物群の分布とマコガレイを含むこれらの炭素と窒素の安定同位体比分析から食物網を解析して、マコガレイ稚魚の主な餌生物を明らかにした。

- ① マコガレイ稚魚は 3 月から 4 月下旬まで人工魚礁の直近に高密度で分布し、その間、平均全長 14mm から 39mm へと成長が確認された。
- ② 人工魚礁には春季に一年生ホンダワラ類のアカモクが繁茂し、葉上動物には端脚目ワレカラ亜目およびヨコエビ亜目が優占し、人工魚礁直近の海底には、端脚目ヨコエビ亜目が出現した。
- ③ 人工魚礁直近の海底は底生動物の生息に適した環境となり、底生動物量が

周辺に比べて極めて多くなるとともに、葉上動物や付着動物が人工魚礁から剥離、落下、あるいは移動し、底生動物層を多様化させていた。

- ④ 4 月中旬に人工魚礁に蛸集した、平均全長 30mm 以上のマコガレイ稚魚は、底生動物に加え、設置された人工魚礁の天端部に繁茂する海藻上に生息する葉上動物や付着動物を餌として利用していた。

以上のことから、極浅海域の人工魚礁はマコガレイ稚魚にとって蛸集機能をもつとともに、餌料供給による増殖機能をもつことが明らかとなった。

【マアジの蛸集・滞留機能と産卵場としての増殖機能】

新潟県佐渡島沿岸の水深約 45m に設置された高層型の人工魚礁では、計量魚探によりマアジの蛸集量を推定するとともに、マアジに発信機を装着し、連続した行動追跡を行った。また、マアジの消化管内容物と人工魚礁周辺に生息する動物群の炭素と窒素の安定同位体比分析から食物網を解析してマアジの主な餌生物を明らかにした。さらに、生殖腺指数（以下、GSI）を調べ、マアジの成熟状況を確認した。

- ① 6 月から 8 月上旬の昼間の人工魚礁には、全長 173～418mm のマアジが 1.53 t 蛸集し、その蛸集量は夜間の 7.1 倍であった。
- ② マアジの行動は昼間には人工魚礁に蛸集し、夜間には人工魚礁から離脱・分散しながら周辺海域 3km 程度の範囲内の表層を遊泳する日周行動を同一人工魚礁で数日間繰り返した。さらに、長期観測（約 2 ヶ月）により、対象魚礁や天然礁を数日間滞留しながら、受信機を設置した 7km 程度の海域内に 1 ヶ月程度滞留した。
- ③ マアジの消化管内容物には浮遊性節足動物門端脚目が優占し、炭素と窒素の安定同位体比分析からも動物プランクトンなどが利用されていた。
- ④ 6 月に人工魚礁に蛸集したマアジ雌は、全長 208mm 以上で、成熟・産卵期の指標である GSI 値 3 以上を示した。

以上のことから、人工魚礁はマアジにとって昼間は蛸集の場であり、人工魚礁滞留時には餌場や産卵場としての増殖機能をもつことが示唆された。

【ズワイガニの蛸集による漁獲からの保護効果と産卵場としての増殖機能】

兵庫県津居山沖の水深約 300m に設置された人工魚礁（以下、保護区）と同一水深帯の人工魚礁が設置されていない対照区で、カゴ網による採捕調査と ROV による直接的な視認観察を行うとともに、ズワイガニと保護区に生息する動物群および底質の炭素と窒素の安定同位体比分析から食物網を解析してズワイガニの餌生物を推定した。

- ① 保護区で 212 個体（20 カゴ）が、対照区で 40 個体（19 カゴ）が採捕され、

- 雄は保護区と対照区で同水準なのに対し、雌は保護区が対照区の 47 倍となった。雌は、保護区で 188 個体が採捕され、全てが抱卵個体であった。
- ② ROV によるズワイガニの生息密度は、保護区で 9.9 個体/1,000 m²、対照区で 4.7 個体/1,000 m²と保護区が対照区の 2.1 倍であった。
 - ③ 保護区における ROV での観察時に人工魚礁直下に定位している雄の成体や産卵中の雌、さらに多毛綱を捕食する雄が観察された。その他、人工魚礁を設置することにより保護された空間には多様な底生動物や魚介類が蛸集していた。
 - ④ 炭素と窒素の安定同位体比分析から、保護区では底質の有機物を基点とする食物網が確認でき、ズワイガニは人工魚礁周辺に分布する底生動物群を利用していることが示唆された。

以上のことから、保護区に設置された人工魚礁にはズワイガニを蛸集させるとともに、漁獲からの保護効果が認められた。また保護区は、抱卵雌ガニに産卵場を提供するとともに、餌場としての増殖機能をもつことが明らかとなった。

本研究により、従来の潜水目視観察や採捕調査などの手法と本研究で有効性を検証した計量魚探、発信機、ROV、および炭素と窒素の安定同位体比分析などの各種手法を適時組み合わせることにより、人工魚礁のもつ蛸集機能に加え増殖機能を体系的に明らかにすることができた。また、極浅海域から水深 300m に至る深海域に設置された人工魚礁では、どの水深帯においても餌生物から対象とした魚介類である高次消費者へとつながる食物網を介して行われる物質循環の過程を確認することが出来た（図-4.1）。さらに、浅海域に設置された人工魚礁では魚礁単体から 5m 程度の範囲内で底生生物相を増加させ、底魚類のマコガレイ稚魚の蛸集に寄与していること、浮魚類のマアジでは夜間の移動範囲から 3km 程度の範囲内に複数基を配置することがマアジの蛸集・滞留にとって有効であること、深海域のズワイガニ保護礁では数 km の保護範囲であっても保護効果が確認されたことなど、人工魚礁の配置計画にとって有効な知見を得ることが出来た。

以上の結果から、人工魚礁と魚介類のかかわり合いは、いずれの人工魚礁においても魚介類を蛸集、滞留させ、捕食者からの逃避場を提供していることが明らかとなった。また、人工魚礁は餌生物を供給し、産卵親魚には産卵の場となっていること、さらに、漁業操業による乱獲や混獲からの保護など、多様な機能の発現を捉えることが出来た。

このような人工魚礁の多様な機能は、様々な生物に対して良好な生息環境を提供することにつながり、生物多様性の維持・保全と生態系の供給サービスの

向上に寄与すると考えられる。しかし、魚介類の行動は物理・化学環境および生物相互作用の変化に対応するため、生態系サービスは常に変動している。したがって、人工魚礁の多様な機能による生態系サービスの恩恵を持続的に享受するためには、基盤となる環境の変化をモニタリングすることが重要である。特に、対象とする魚介類の生活史に対応した生息範囲や摂餌活動の変化、海域に存在する複数の生態系相互の関係性の変化やそれらが及ぼす対象とする魚介類の資源量の変動などを把握することが重要であると考ええる。

一方、人工魚礁の多様な機能がもたらす供給サービスを持続的に受けるためには、モニタリングで得られた科学的な根拠に基づき、乱獲や混獲の防止などの漁業管理を行い、さらに、より積極的な海洋保護区 (Marine Protected Area ; 以下、MPA) の設定による、漁場管理を併せて行うことが重要である (図-4.2)。それにより、対象とした魚介類に好ましい生態系が保全され、本研究で示したズワイガニ保護礁でみられたように、MPA より染み出した資源を管理しながら利用することが可能となり、このことが、持続可能な漁業の推進に役立つものと考えられる。

MPA については、現在、欧米で一つの方向として自然・人間分離型の自然保護が行われている (桜井, 2010)。しかし、従来、我が国で行われてきた海域利用管理の考え方は、人間が関与することで生態系を出来る限り維持・再生し、自然の生産力を利用して生物生産を高めていくという、いわば自然・人間共存型の考えが根底にあると考えられる。人工魚礁の設置と漁場管理を併せて行うことは、人間社会と自然環境の共生のあり方、すなわち合理的な漁獲行為と生態系の保全や生物多様性と共存するための視点であると考えられる。

また、これまで人工魚礁の多様な機能は、漁獲量の増加、すなわち生態系から享受する供給サービスの向上として評価されてきた。このことは、人工魚礁の多様な機能のうち、魚介類が蟄集し漁獲量が増加することにより、漁業者にとっての経済効果に加え、消費者に対する水産物の安定供給といった社会・経済的な側面のみ評価されてきたと言える。しかし、人工魚礁の多様な機能は、漁獲量の増加としての供給サービスのみではなく、水質浄化や炭素固定といった調整サービスや将来世代が利用する資源を生み出す良好な環境といった基盤サービス等、幅広い領域の生態系サービスの向上に寄与していると考えられる。

人工魚礁が持つ多様な機能とそれに基づく生態系サービスの全容を評価する方法については、いまだ研究の余地は残るが、幅広い領域の生態系サービスの向上効果を適正に価値評価するためには、新たな評価手法として、社会・生態的な価値評価を行うことが必要と考える。すなわち、漁業を通じて直接利用する漁獲のみだけでなく、直接的には利用しない様々な生物も含めて潜在的な資源として捉え、生態系全体の生産力として評価する考え方である。

例えば、本研究によって明らかとなった人工魚礁がもつ増殖機能の一つである餌場機能を評価対象とする(1)式の方法が考えられる。具体的には、人工魚礁の設置により期待される餌の総量〔人工魚礁に着生する海藻類の葉上動物量、付着動物量および底生動物量（対照区との密度差）〕を、種苗生産施設などで使用される人工餌料の市場価格で代替し貨幣化する方法である。従来は、餌の総量から漁獲量に換算して算定していたが、直接利用されない生物も含めて餌生物量そのものを評価対象としている点で、社会・生態的な価値評価に接近している。

参考として、人工魚礁周辺での餌生物の増加効果を、第1章マコガレイ稚魚の蛸集機能と餌料供給による増殖機能における岡山県日生町沿岸域での結果をもとに試算例として示すとともに、比較対象として、従来から行われてきた蛸集機能による漁獲量の増加効果を価値評価として示した(表-4. 1)。この結果、従来からの漁獲量の増加効果での価値評価は約135万円に対して、餌場機能による価値評価は約970万円であった。なお、この考え方には、貨幣化の際の代替財として人工餌料の市場価格を用いることの妥当性や発生する餌生物と人工餌料の餌料転換効率の差を考慮する必要性などの課題があるが、これらの解決を含めて、社会・生態的な価値評価手法の検討を進めることが重要であると考えられる。

《社会・生態的な価値による価値評価》

価値評価 (B) (餌場機能)

$$B = Qb \times Pb \dots \dots \dots (1)$$

$$= \underline{9,670 \text{ 千円/年}}$$

B : 餌料供給による年間の価値評価

Qb : 総餌生物量 (kg/年)

Pb : 種苗生産施設における餌料平均単価 (円/kg)

《参考：従来から行われてきた漁獲による価値評価》

価値評価 (B)

$$B = Q \times P \times (1 - Cr)$$

$$= \underline{1,347 \text{ 千円/年}}$$

Q : 期待漁獲量 (kg/年)

$$Q = Qu \times v$$

Qu : 漁獲原単位 (kg/m³・年) v : 事業量 (m³)

P : 平均単価 (円/kg)

Cr : 生産量増加に伴う年間漁業経費率

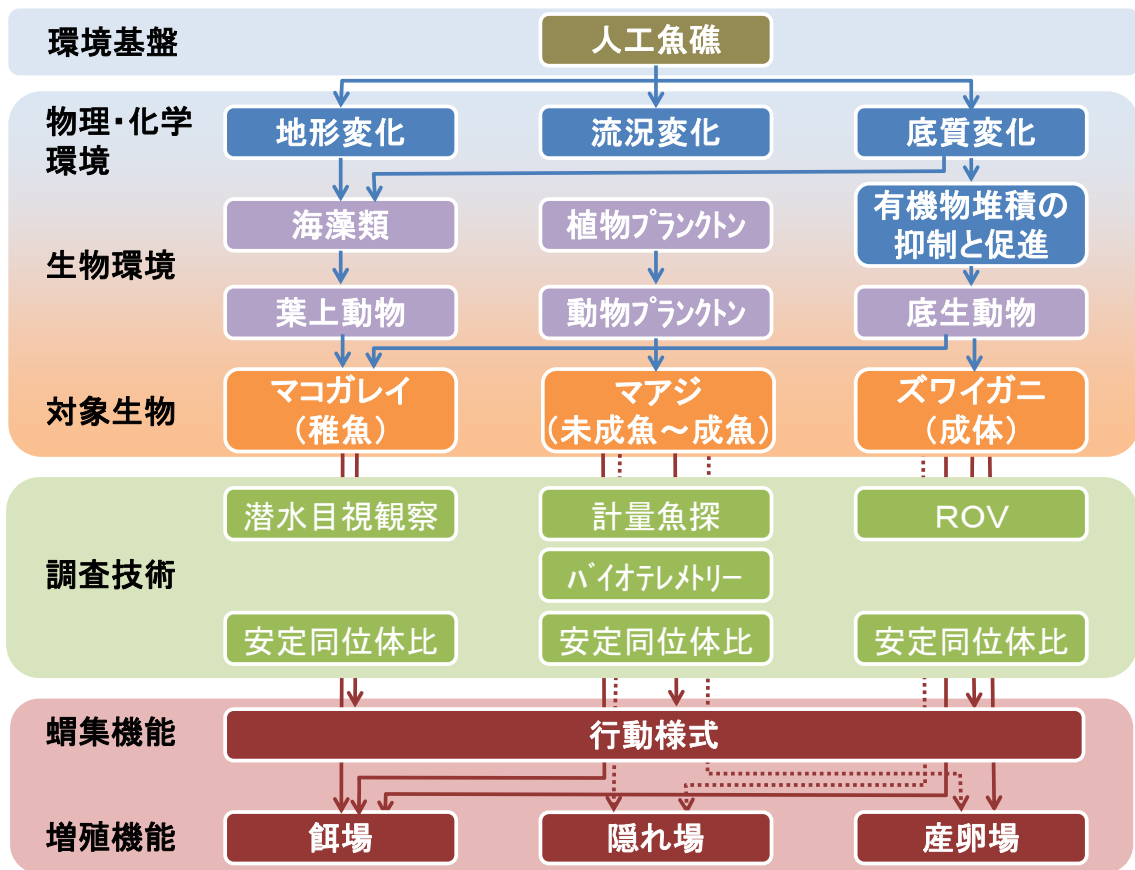


図-4.1 人工魚礁の機能

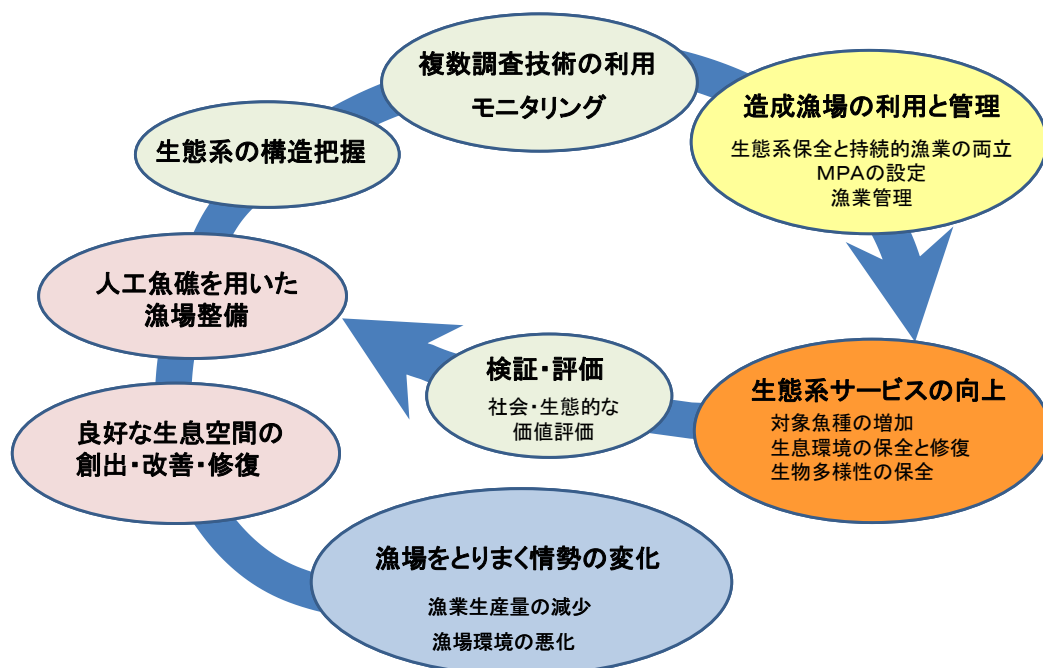


図-4.2 人工魚礁を用いた漁場整備に関する提案

表-4.1 岡山県日生町沿岸域における餌場機能の価値評価

区分	算定基礎	単位	備考
葉上動物	海藻1kg当たり葉上動物現存量	0.055 kg／海藻kg	
	海藻年間生産量	5.437 kg／基・年	
	葉上動物年間生産量	0.897 kg／基・年	海藻1kg当たり葉上動物現存量×海藻生産量×P/B
	設置基数	30 基	
	餌料単価	3,000 円／kg	マコガレイ種苗生産人工餌料単価
	年間価値評価	80,730 円／年	葉上動物年間生産量×設置基数×餌料単価
底生動物	人工魚礁単体効果範囲底生動物現存量	0.034 kg／m ²	人工魚礁単体から4mの範囲
	人工魚礁単体効果範囲底生動物年間生産量	0.102 kg／m ² ・年	人工魚礁単体効果範囲底生動物現存量×P/B
	対照区底生動物現存量	0.008 kg／m ²	
	対照区底生動物年間生産量	0.024 kg／m ² ・年	対照区底生動物現存量×P/B
	人工魚礁効果範囲	1,838 m ² ／基	人工魚礁単体30基分の効果範囲
	餌料単価	3,000 円／kg	マコガレイ種苗生産人工餌料単価
	年間価値評価	430,092 円／年	(人工魚礁単体効果範囲底生動物年間生産量－対照区底生動物年間生産量)×人工魚礁効果範囲×餌料単価
付着動物	単位付着動物現存量	0.989 kg／m ³	コンクリートテストピース付着動物現存量
	魚礁容積	34.3 m ³ ／基	
	付着動物現存量	34 kg／基	テストピース付着動物現存量×魚礁単体容積
	付着動物年間生産量	102 kg／基・年	付着動物現存量×P/B
	設置基数	30 基	
	餌料単価	3,000 円／kg	マコガレイ種苗生産人工餌料単価
	年間価値評価	9,159,129 円／年	付着動物年間生産量×設置基数×餌料単価
計		9,669,951 円／年	

注) P/B : Production(生産量)とBiomass(現存量)の比

「水産基盤整備事業費用対効果分析のガイドライン 参考資料(平成21年4月 水産庁漁港漁場整備部)」により3と設定

謝辞

本研究論文をとりまとめるにあたり、指導教員として終始ご指導を頂きました北海道大学大学院水産科学院 海洋生物資源科学専攻 資源生物学講座 櫻井泰憲教授には衷心より感謝申し上げます。また、学位論文審査にあたりご指導とご高閲を頂いた水産工学講座 木村暢夫教授（主査）、資源生物学講座 高津哲也教授、海洋計測学講座 藤森康澄教授に衷心より感謝申し上げます。

人工魚礁研究を進めるにあたり導いて頂きました（元）水産大学校教授の柿元皓博士（故人）には、著者が社団法人全国沿岸漁業振興開発協会に在職中から、公私にわたりご指導を頂きました。先生のご指導があつてどうにか研究者（人）としての路を歩むことが出来ました。本当に有り難うございました心より感謝申し上げます。また、学位論文への道筋をつけて頂きました（元）北海道東海大学津村憲教授に感謝申し上げます。

本研究の趣旨をご理解頂きサポートして頂きました、当研究所影山智将理事長をはじめ当研究所の皆様に感謝申し上げます。

本論文に関する研究活動では当研究所主任研究員 三浦浩氏、株式会社シャトー海洋調査 吉田司博士、いであ株式会社 中野喜央氏（当研究所に出向在籍）および当研究所漁場と海業研究室時代の研究員各位、現在の第2調査研究部（漁場チーム）の研究員各位には、研究の多岐にわたりご協力を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。また、研究を進めるにあたり、各種委員会等でご指導を頂いた、（元）日本海区水産研究所 安永義暢博士はじめご助言頂きました各種委員会の委員の先生方に感謝申し上げます。

現地調査やとりまとめなどにご助言を頂いた株式会社水土舎 深瀬一之氏、麓貴光氏、海洋建設株式会社 藤澤真也氏に感謝申し上げます。さらに、現地調査に際して協力頂いた株式会社シャトー海洋調査、株式会社水土舎、海洋建設株式会社、海洋土木株式会社のスタッフの皆様に感謝申し上げます。

最後に、仕事や研究活動で休日も少なく、家を空けてばかりの生活でも励まし、支えてくれた妻郁子と応援してくれた家族に感謝と敬意を表し謝辞と致します。

2014年6月6日

参 考 文 献

- Adams, P. B., Butler, J. L., Baxter, C. H., Laidig, T. E., Dahlin, K. A. and Wakefield W. W. (1995): Population estimates of Pacific coast groundfishes from video transects and swept-area trawls. *Fish. Bull.*, **93**: 446-455.
- Antony, T. (2002): Artificial reef of Europe, perspective and future. *ICES J. Mar. Sci.*, **59**: 1-13.
- 有山啓之 (2003): 大阪湾中部沿岸域におけるマコガレイ稚魚の分布および食性について. 大阪府水産試験場研究報告, 大阪, **14**: 17-28.
- Carol A. Couch. (1989): Carbon and Nitrogen stable isotopes of meiobenthos and their food resources. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, **28**: 433-441.
- DeNiro, M. J. and Epstein, S. (1978): Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geoc. Com. Acta.*, **42**: 495-506.
- DeNiro, M. J. and Epstein, S. (1981): Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geoc. Com. Acta.*, **45**: 341-351.
- FAO (2005): Putting into Practice the Ecosystem approach to Fisheries. *FAO, Rome*, 76pp.
- FAO (2006): Expert workshop on marine protected areas and fisheries management : review of issues and consideration. *FAO, Rome, Fisheries Report*, **825**: 332pp.
- 福永辰広 (1976): マコガレイの種苗生産, とくに稚魚期までの水槽による一貫飼育について. 栽培技研報, **5**: 37-44.
- 福井県水産試験場 (1998): 続"越前がに"の世界, その生活史と生態. 福井県, 福井, 36.
- 古澤昌彦 (1990): 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水産工学研究所研究報告, **11**: 173-249.
- (財)漁港漁場漁村技術研究所 (2009): 平成 19~21 年度水産基盤整備におけるカツオ・マグロ類等の増殖可能性調査報告書. (財)漁港漁場漁村技術研究所, 東京, 12-14.
- 橋本 惇, 堀田 宏. (1985): 曳航式深海TVシステムおよび潜水調査船「しんかい 2000」による表在性メガロベントス分布密度推定の試み. 第1回「しんかい 2000」シンポジウム報告書, (社)海洋科学技術センター, 横須賀, 23-35.
- Ikeda, T. (1990): A Growth Model for a Hyperiid Amphipod *Themisto japonica* (Bovallius) in the Japan Sea, Based on Its Intermoult Period and Moults Increment. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46(6)**: 261-272.
- 今島 実 (1996): 「環形動物, 多毛類」. 生物研究社, 東京, 530pp.
- 今島 実 (2001): 「環形動物, 多毛類II」. 生物研究社, 東京, 542pp.

- 稲葉明彦 (1988): 「増補改訂 瀬戸内海の生物相Ⅱ」. 広島大学理学部附属向島実験所, 広島, 475pp.
- 石田 修, 田中邦三, 佐藤秀一, 庄司泰雄 (1977): ヒラメの資源生態調査-Ⅱ, 館山湾における若齢期の生態. 千葉県水産試験場研究報告, 千葉県水産試験場, 千葉, **36**: 23-31.
- 石樋由香, 横山 寿 (2008): 濃縮係数の変動性—魚類を例として, 「安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態, 水産学シリーズ」. 恒星社厚生閣, 東京, **159**: 31-45.
- 石野健吾, 三原栄次 (1995): マコガレイ(地域重要資源; 回遊型), 平成 6 年度北海道立函館水産試験場事業報告書. 北海道, 269-279.
- 伊藤 靖, 中野喜央, 高橋秀行, 横山禎人, 井上清和 (2007): 人工魚礁におけるアジ類の蛸集状況. 平成 19 年度日本水産工学会学術講演会, 191-194.
- 伊藤 靖, 中野喜央 (2007): 人工魚礁におけるアジの蛸集・滞留について, 「安全で安心な明るい漁村の未来を拓くために」, 調査研究成果発表会論文集, 漁港漁場漁村技研. (財)漁港漁場漁村技術研究所, 東京, 41-46.
- 伊藤 靖, 中村憲司, 吉田 司 (2012): 鹿児島県阿久根地先の人工マウンド礁における超音波バイオテレメトリーを用いたマアジの行動について. 平成 24 年度日本水産工学会学術講演会, 3-6.
- 岩井 保 (1985): 「水産脊椎動物Ⅱ魚類」. 恒星社厚生閣, 東京, 213-217.
- 香川県水産試験場, 岡山県水産試験場, 福岡県水産試験場, 大分県水産試験場, 山口県水産試験場 (1975): 昭和 46~49 年度魚類放流技術開発調査カレイ類総括報告書. 香川県, 岡山県, 福岡県, 大分県, 山口県, 1-51.
- 柿元 皓 (1971): 昭和 45 年度人工魚礁効果研究報告. 新潟県水産試験場, 新潟, 21-25.
- 柿元 皓 (1984): 新潟県沿岸域の人工魚礁漁場における魚類の行動学的研究. 新潟県水産試験場, 新潟, 33-34.
- 金丸信一, 安達二郎 (1992): 島根県日御碕沖ズワイガニ保護礁設置海域におけるズワイガニ蛸集状況の観察—(1). 第 8 回「しんかい 2000」シンポジウム報告書. (社)海洋科学技術センター, 横須賀, 305-312.
- 笠井亮秀 (2008): 安定同位体比を用いた餌料源の推定モデル, 「安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態, 水産学シリーズ」. 恒星社厚生閣, 東京, 46-52.
- 金治 佑, 渡邊良郎 (2007): 対馬暖流域におけるマアジの初期生態. 月刊海洋, **39**: 561-565.
- 小林啓二, 永井浩爾 (1991): 鳥取県沖合におけるズワイガニ保護礁と底生生物群集の観察. 第 7 回「しんかい 2000」シンポジウム報告書, (社)海洋科学技術センター, 横須賀, 267-275.

- 今 攸 (1969): ズワイガニに関する漁業生物学的研究－Ⅲ, 水深別にみた分布密度と甲幅組成. 日本水産学会誌, **35**: 624-628.
- 今 攸, 安達辰典, 領家一博 (1997): 福井県沖合におけるズワイガニ保護礁の造成. 平成 8 年度福井県水産試験場業務報告書, 福井県水産試験場, 福井, 146-153.
- 桑原昭彦, 篠田正俊, 山崎 淳, 遠藤 進 (1995): 「日本海西部海域におけるズワイガニの資源管理, 水産研究叢書」.(社)日本水産資源保護協会, 東京, **44**: 2-82.
- Miller, R. J. (1975): Density of commercial spider crab, *Chionoecetes opilio*, and calibration of effective area fished per trap using bottom photography. *J. Fish. Res. Board Can.*, **32**: 761-768.
- Minagawa, M. and Wada, E. (1984): Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**: 1135-1140.
- 南 卓志 (1981): マコガレイの初期の生活史. 日本水産学会誌, **47**: 1411-1419.
- Murawski, S. A., Steele, J. H., Taylor, P., Fogarty, M. J., Sissenwine, M. P., Ford, M. and Suchman, C. (2010): Why compare marine ecosystems? *ICES J. Mar. Sci.*, **67**: 1-9.
- 睦谷一馬 (1988): 人工飼育におけるマコガレイ仔稚魚の成長と変遷について. 水産増殖, **36**: 27-32.
- 中神正康, 高津哲也, 松田康平, 高橋豊美 (2000): 北海道津軽海峡沿岸におけるマコガレイ稚魚によるハルパクチクス目の捕食. 日本水産学会誌, **66(5)**: 818-824.
- 日本海区水産研究所 (2009): 平成 20 年度日本海マアジ長期漁況予報, 日本海区水産研究所ホームページ,
<http://jsnfri.fra.affrc.go.jp/kenkyu/yohou/H20yohou/yohou080519.pdf>, 2011/6/30 参照.
- 日本海洋学会 (1986): 4. ベントス調査, 「沿岸環境調査マニュアル, 底質・生物篇」. 恒星社厚生閣, 東京, 217-257.
- 日本気象協会 (1981): 「海洋観測指針」. 気象庁, 東京, 168-174.
- (社)日本水産資源保護協会 (20012): 「水産用水基準 (2012 年版)」.(社)日本水産資源保護協会, 東京, 95pp.
- (財)日本水路協会, 海洋情報研究センター (1997): 「海洋利用の手引き, 日本海編」.(財)日本水路協会, 東京, 4. 気象・海象.
<http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/1997/01269/contents/001.htm>, 2011/6/30 参照.
- 西田 宏, 長谷川誠三 (1994): 新潟沿岸におけるマアジ産卵群の年齢と成長. 日本海区水産研究所研究報告, **44**: 73-80.

- 西田 宏 (2004): マアジの産卵特性, 「マアジの産卵と加入機構, 水産学シリーズ」. 恒星社厚生閣, 東京, **139**: 11-17.
- 野田幹雄, 田原 実, 片山貴之, 片山敬一, 柿元 皓 (2002): 内部空隙をもつ管状基質が無脊椎動物, 特に魚類餌料動物の加入に与える効果. 水産増殖, **50(1)**: 37-46.
- 落合 明, 田中 克 (1998): マコガレイ, 「魚類学 (下)」. 恒星社厚生閣, 東京, 1106-1110.
- 落合 明, 田中 克 (1998): マアジ, 「魚類学 (下)」. 恒星社厚生閣, 東京, 790-791.
- 小川良徳 (1968): 人工魚礁と魚付き, 人工魚礁とその効果. 水産増殖, 臨時 7 号:1-21.
- 大橋洋一 (1993): 石川県加賀沖のズワイガニ保護魚礁周辺海域における底生生物の観察. 第 9 回「しんかい 2000」シンポジウム報告書, (社)海洋科学技術センター, 横須賀, 351-359.
- 岡山県 (2002): 地域の概要. 東部海域整備計画書, 岡山県, 74-81.
- Okutani, T. (1969): Synopsis of bathyal and abyssal megalo-invertebrates from Sagami Bay and the south off Boso Peninsula trawled by the R/V Soyo-Mar. *Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab.*, 57: 1-61.
- 桜井泰憲 (2010): 知床世界自然遺産地域の海域保全と海洋保護区. 環境研究, **158**: 1-8.
- Shannon, C. E. and Weaver., W. (1949): The Mathematical Theory of Communications. *University of Illinois Press*, 117.
- 示野貞夫 (1983): 糖代謝系, 「魚類の物質代謝, 水産学シリーズ」. 恒星社厚生閣, 東京, **47**: 9-22.
- 新崎敏盛, 堀越増興, 菊池泰二 (1976): 「海藻・ベントス」. 東海大学出版会, 東京, 222.
- 水産庁 (1983): 筑前海東部地区, 大規模増殖場造成事業総合報告書. 昭和 57 年度版 (宗谷, 知内・福島, 豊浦・虻田, 浜中, 寿都, 白糠, 青森西海, 久慈, 大船渡, 種市中, 酒田, 飛島, 榛南, 福江, 出雲東部, 津田, 筑前海東部, 姫島, 延岡北部各地区), 水産庁, 東京, 1-31.
- 水産庁, 水産総合研究センター (2007): 平成 18 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 第 1 分冊. 水産庁, 東京, 433-454.
- 水産庁, 水産総合研究センター (2013): 平成 25 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, www.jfa.maff.go.jp/j/sigen/sigen_hyouka.html. 参照
- 水産庁, (財)漁港漁場漁村技術研究所 (2009): 平成 20 年度人工魚礁におけるアジ類の蛸集及び増殖機能に関する調査報告書. 水産庁, (財)漁港漁場漁村技術

- 研究所, 東京, 31-34.
- 水産庁, (財)漁港漁場漁村技術研究所 (2010): 平成 21 年度人工魚礁におけるアジ類の蛸集及び増殖機能に関する調査報告書. 水産庁, (財)漁港漁場漁村技術研究所, 東京, 12-13.
- 水産庁 (2010): 水産基盤整備事業費用対効果分析のガイドライン—参考資料—. 水産庁, 東京, 17-33.
- 鈴木知之 (1965): マアジの生態学的研究 I 食性について. 日本海区水産研究所研究報告, **14**: 19-29.
- 鈴木恒由, 佐野典達, 飯田浩二 (1984): 渡島半島東部における音響散乱層の時間的挙動について. 北海道大学水産学部研究彙報, 北海道大学, 函館, **35(4)**: 243-253.
- 反田 實 (2008): 兵庫県瀬戸内海におけるマコガレイの生態と漁業に関する研究. 兵庫県立農林水産技術センター水産技術センター, 兵庫県, **40**: 49-57.
- 田中丈裕 (1998): 第 4 節カキ殻による漁場環境の改善(1)カキ殻による餌料培養「沿岸の環境圏」. フジテクノシステム, 東京, 1226-1243.
- 東海 正, 伊東 弘, 山口義昭 (1989): 周防灘におけるカレイ類の生態と漁業実態. 海洋牧場マリーナランディング計画, 農林水産技術会議編, 恒星社厚生閣, 東京, 138-156.
- 津村 憲, 柿元 皓(1992): 海産魚類の魚礁性について. 平成 4 年度水産工学会学術講演会, 1-2.
- 和田栄太郎. (1986): 生物関連分野における同位体効果—生物界における安定同位体分布の変動. *Radioisotopes* **35**: 136-146.
- 渡部俊広, 廣瀬太郎 (2001): 曳航式深海用ビデオカメラによるズワイガニの生息密度の推定. 日本水産学会誌, **67(4)**: 640-646.
- Watanabe, T. (2002): Development of the deep-sea video monitoring system on a towed sledge to estimate the population density of the snow crab *Chionoecetes opilio*. *Fish. Sci.* **68**(supplement I): 101-104.
- 山西良平. (1979): かきまぜ法によるメイオベントス抽出の効率. ベントス研連誌, **17/18**: 52-58.
- 山田鉄夫 (1969): 日本海におけるマアジの分布と漁場に関する考察. 長崎大学水産研究報告, 長崎, **28**: 111-130.
- 山崎 淳, 桑原昭彦 (1991): 日本海における雄ズワイガニの最終脱皮について. 日本水産学会誌, **57**: 1839-1844.
- 安田 徹 (1967): 若狭湾におけるズワイガニの食性—I, 胃内容物組成について. 日本水産学会誌, **33(4)**: 315-319.
- 安永義暢 (1985): 2, 3 の海産魚類の走流性状に関する基礎的考察. 水産工学研究

- 所報告, **6**: 17-26.
- 依田真里, 佐々千由紀 (2004): マアジの産卵場の特定と海洋環境, 「マアジの産卵と加入機構, 水産学シリーズ」. 恒星社厚生閣, 東京, **139**: 19-30.
- Yokoyama, H. and Ishihi, Y. (2003): Feeding of the bivalve *Theora lubrica* on benthic microalgae: isotopic evidence. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **255**: 303-309.
- Yokoyama, H. and Ishihi, Y. (2007): Variation in food sources of the macrobenthos along a land-sea transect: a stable isotope study. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **346**: 127-141.
- 吉田 創, 田原 実, 片山貴之, 片山敬一, 柿元 皓 (2001): 貝殻を利用した餌料培養基質の特性－基質の表面積, 空隙率と着生量との関係－. 平成 13 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, 19-22.
- 吉川浩二 (1978): 沿岸海域藻場調査, 藻場環境生態調査報告書(1) (生物, 環境関係). 南西海区水産研究所, 山口県内海水産試験場, 大分県浅海漁業試験場, 愛媛県水産試験場, (社)漁業情報サービスセンター, 東京, 69-81.
- (社)全国豊かな海づくり協会 (2008): 主要対象生物の発育段階の生態的知見の収集・整理. (社)全国豊かな海づくり協会, 東京, 161-164.