

瀬戸内海豊前海におけるシャコの資源解析と資源状況

亘 真吾,^{1*} 石谷 誠,² 尾田 成幸²

(2011 年 2 月 25 日受付, 2011 年 6 月 25 日受理)

¹佃水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所, ²福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所Stock assessment and stock status of the Japanese mantis shrimp
Oratosquilla oratoria in the Buzen Sea, Seto Inland Sea, JapanSHINGO WATARI,^{1*} MAKOTO ISHITANI² AND SHIGEYUKI ODA²¹National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, ²Fukuoka Fisheries and Marine Technology Research Center Buzenkai Laboratory, Buzen, Fukuoka 828-0022, Japan

A stock assessment of Japanese mantis shrimp *Oratosquilla oratoria* was conducted using research data sampled by small trawl vessel in the Buzen Sea, Seto Inland Sea, Japan, from 2007 to 2009. The fishing mortality coefficient estimated for every half-year from the 2007 year class suggested that the reduction of population by discard began soon after recruitment. The survival rate after one year of recruitment was estimated as 13.4%. The reduction of individuals before growing to the minimum landing size was large. The yield per recruit and spawning per recruit analyses show that to increase both catch and egg production, reduction of fishing effort until two years after settlement is effective. It is particularly important to reduce the fishing effort during the next summer after settling which includes high discard mortality.

キーワード : SPR, YPR, 小型底曳網, シャコ, 豊前海

豊前海は瀬戸内海最西部、周防灘の福岡県沿岸の海域で、小型底曳網（以下、小底）による漁業が盛んである（Fig. 1）。ここでは、ビームを用いる小底 2 種エビ漕ぎ網（以下、エビ漕ぎ網）と、貝桁を用いる小底 3 種桁網（以下、桁網）により、シャコ *Oratosquilla oratoria* やエビ類、カニ類、カレイ類などの底生生物を主に漁獲している。このうちシャコは、以前はあまり重要な漁獲対象資源ではなかったが、1980 年代頃から他の水産資源の減少や、シャコの経済的価値の高まりにより、主要漁獲物の 1 つとなり水揚げに占める割合が高まってきた。¹⁾

当海域におけるシャコの資源管理は、1992 年から豊前海の漁業者の自主的な取り組みとして、小型個体の保護のため、眼の先端から尾節の亜中央棘の先端までの長さが 120 mm 以下の個体の再放流が実施されている。²⁾ また、近年の漁獲量の減少にともない、周防灘沿岸の山口、福岡、大分の 3 県で、2004 年から周防灘小型機船底びき網漁業対象種資源回復計画が実施され、シャコも

計画対象種の 1 つに指定されている。本計画では、全長 100 mm 以下の個体の水揚げ制限や休漁期の設定など資源管理の取り組みが行われ、計画終了時に 2004 年の計画対象種の合計の漁獲量水準を維持することを目指している。しかし、1989 年に最大で 1,202 t 漁獲されていた福岡県豊前海のシャコの漁獲量は、2009 年には 7 分の 1 の 169 t にまで減少している（Fig. 2）。また、近年の標本船 CPUE も減少傾向であることから（Fig. 3）、現在実施されている管理方策では、シャコの資源水準を維持する効果が十分でない可能性がある。

周防灘におけるシャコの資源生物学的研究は、1980 年代後半から 1990 年代にかけて、成長や成熟などについて精力的に実施されてきた。^{1,3-7)} また、当時より漁獲物としての重要性から、資源診断に基づくシャコの管理方策の検討の必要性が指摘されてきた。⁶⁾ しかし、今日に至るまで、定量的な資源評価の知見は得られておらず、資源管理の推進への大きな課題となっている。本研究では、豊前海において小底漁船による定点調査データ

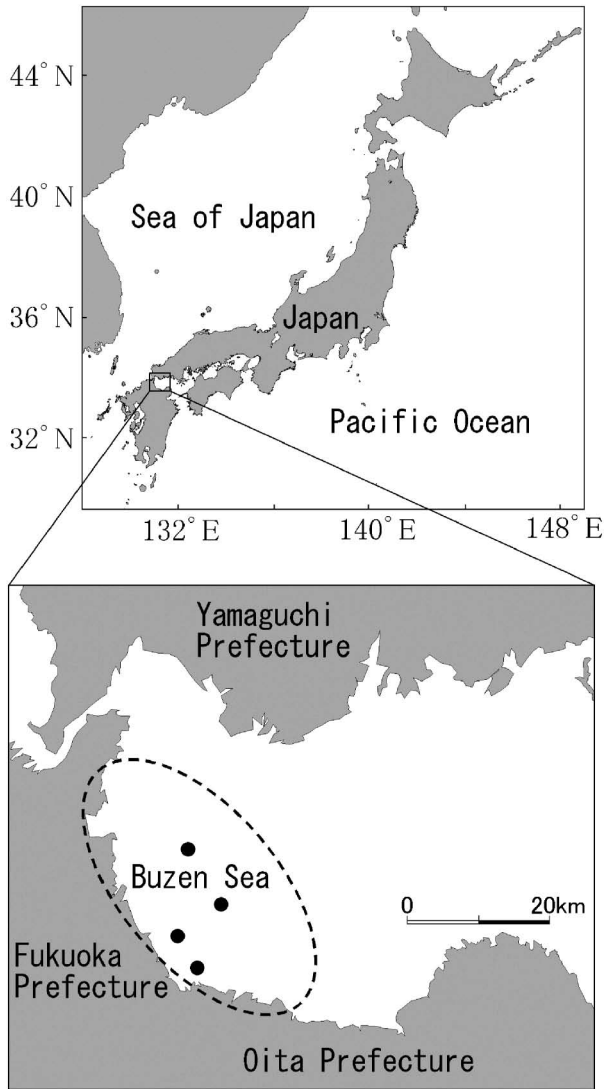


Fig. 1 Location of the Buzen Sea (dashed ellipse) and sampling points (filled circles) of the small bottom trawl survey.

を用いて、体長組成から分離した年級群を追跡し、減少率から着底後半年ごとの期間にかかる漁獲圧を推定した。さらに、加入あたり漁獲量（以下、YPR (g)）と、加入あたり産卵量（以下、SPR (個)）により、加入後のシャコ資源の有効利用に向けた方策について検討した。

試料および方法

標本 2007年4月から2009年4月にかけて用船した小底漁船を使用し、底曳網によりシャコを採捕した。11~4月の調査は、桁の幅が2.4 mの桁網を2丁曳きで使用した。この漁法は、鋼鉄製の枠に取り付けた網を曳き、枠の下についた爪で海底面を掘り起こして生物を捕獲する構造から、シャコに対する漁獲効率が高く、⁷⁾ シャコの採捕に適していると考えられる。漁業許可の関係

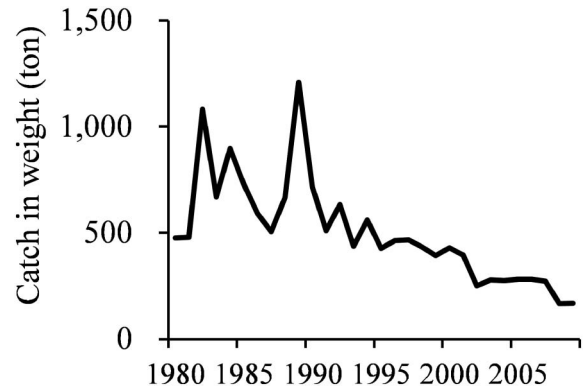


Fig. 2 Catch in weight of Japanese mantis shrimp from 1980 to 2009 in Fukuoka Prefecture from the Buzen Sea, Seto Inland Sea.

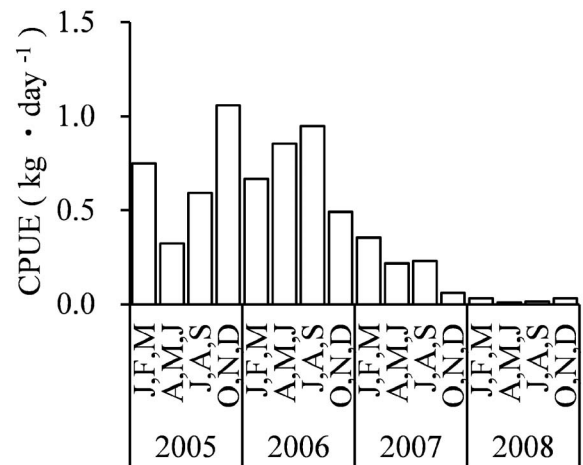


Fig. 3 Catch per unit effort (CPUE) of Japanese mantis shrimp by sample trawl fishing boats from 2005 to 2008 in the Buzen Sea, Seto Inland Sea.

で桁網が使用できない5~10月の調査は、網口部分のビームの長さが15 mのエビ漕ぎ網を使用した。両漁法とも、袋網の目合が22節（実測目合13.0 mm）のものを使用した。調査は毎月1回、4定点（Fig. 1）において、3ノットで約20分間曳網した。このうちエビ漕ぎ網による12点の曳網が大量のミズクラゲの出現のため、また、桁網による2点の曳網が荒天のため実施できなかった。入網物からシャコを船上で選別し、漁船の活魚水槽に入れ豊前海研究所に持ち帰り、体長（ L 、頭胸甲前端から尾節の中央湾入前端までの長さ）⁸⁾を1 mm単位で、体重（ W ）を0.1 g単位で計測した。体長と体重の関係を、以下のアロメトリー式で推定した。

$$W = \alpha L^{\beta} \quad (1)$$

α と β はアロメトリー式のパラメータで、最小二乗法で推定した。 y 年 m 月の1 km²あたりの採捕尾数 $B_{y,m}$ （尾/km⁻²）を桁の幅、またはビームの長さ、曳網距

離, 各月の採捕尾数を用いて算出した。

年級群の分離 安定してサンプルが採捕できた桁網での調査期間について, 雌雄を合わせた体長組成を複合正規分布にあてはめ, 年級群の分解を行った。 y 年 m 月の i 番目の群の正規分布の割合 $p_{i,y,m}$, 平均 $\mu_{i,y,m}$ (mm) をそれぞれ推定した。⁹⁾ なお, 分散 $\sigma_{i,y,m}^2$ (mm²) は予備的に年, 年齢, 月別に推定したところ, 年や年齢, 隣り合う月の間で標準偏差が倍以上の差があるケースがあったため, 年齢や月によらず共通の σ^2 とした。 i は $\mu_{i,y,m} < \mu_{i+1,y,m}$ となるよう設定した。パラメータの 95% 信頼区間を尤度比より推定した。年級群は, 前月に確認できない体長の小さな個体群の出現を新規の着底とし, その後, 体長組成の平均値とモードの推移から判断した。

全減少係数 シャコの産卵期は 4~9 月で,¹⁰⁾ 1~2 ヶ月間の浮遊幼生期を経て着底すること¹¹⁾ が報告されている。そこで, その年の新規の着底が終了していると考えられる 11 月の時点を加入と考えた。シャコの体長の増加は脱皮によるが, 脱皮のタイミングや間隔は, 飼育環境下でも個体により異なる。¹²⁾ また, 天然海域では, 脱皮について十分な知見がないため, 当海域のシャコについて共通した脱皮の間隔を設定し, そこから減少率を推定することは困難であった。一方, 当海域の漁業は 11~4 月の半年間は桁網, 5~10 月の半年間はエビ漕ぎ網により操業が行われ,¹³⁾ 漁獲効率は桁網の方がエビ漕ぎ網より高い。¹⁴⁾ このような漁期と漁法の違いを考慮した管理効果を検討するため, 着底から寿命まで半年ごとに, 漁法の変化と対応させた期間を t とした。調査期間のうちで加入以降, 最も長く存在する 2007 年に生まれた群 (以下, 2007 年級群) を用いて, t 期始めの時点での同年級群の 1 km² あたりの採捕尾数 N_t (尾/km⁻²) の減少量から, 全減少係数 $Z_{(half\ year)t}$ (/半年⁻¹) を推定した。 t は, 2007 年 11 月~2008 年 4 月までの桁網の期間, 2008 年 5~10 月のエビ漕ぎ網の期間, 2008 年 11 月~2009 年 4 月までの桁網の期間を, それぞれ 1 期, 2 期, 3 期とした。着底後の寿命が 45 月齢であることから,⁵⁾ 4 期以降は, 半年間の漁期と対応させ 7 期まで考慮した。 N_t は, $B_{y,m}$ と複合正規分布のうち y 年 m 月の 2007 年級群の正規分布の比率 $p_{i,y,m}$ より, 以下の式で推定した。

$$N_t = B_{y,m} \times p_{i,y,m} \quad (2)$$

4 月の調査は桁網の操業期間が終了してから, 5 月のエビ漕ぎ網の操業が開始されるまでの休漁期間中に実施し, 11 月の調査は桁網の操業が開始された直後に実施した。このため, 4 月と 11 月の桁網の調査で得られた情報は, 1~4 期の始めの時点での採捕尾数を示すと考え, N_t の算出には, 1 期が 2007 年 11 月, 2 期が 2008 年 4 月, 3 期が 2008 年 11 月, 4 期が 2009 年 4 月の $B_{y,m}$,

$p_{i,y,m}$ を使用した。 $Z_{(half\ year)t}$ は以下の関係から推定した。

$$Z_{(half\ year)t} = F_t + M_t \quad (3)$$

ここで F_t は漁獲係数 (/半年⁻¹) で, 水揚げと投棄による死亡の両方を含んでいる。 M_t は自然死亡係数 (/半年⁻¹) で, 石岡ら¹⁵⁾ が着底翌年の 5 月以降について推定した値を用い, 2 期以降 $M_t = 0.4$ とした。当海域のシャコの CPUE の解析では, 月ごとの空間的な移動の傾向は見られていない。¹⁾ しかし, 小底によるシャコの漁獲量は, 同一の漁法でも冬の低水温期におけるシャコの活動低下の影響を受け, 資源密度のみでなく時期によっても変化する。⁷⁾ 半年間の単位面積あたりの採捕尾数の減少量から $Z_{(half\ year)t}$ を求めると, 推定値に資源の減耗以外の要因も含まれる可能性がある。このため, まず, 同一の月となる t 期の始めの時点と $t+2$ 期の始めの時点での単位面積あたりの採捕尾数の減少量から, 1 年間の全減少係数 $Z_{(one\ year)t}$ (/年⁻¹) を求めた。そして $Z_{(one\ year)2}$ から F_t を求め, 2 期以降の $Z_{(half\ year)t}$ を (3) 式で推定した。また, 1 期の $Z_{(half\ year)t}$ と M_t は, 以下の関係より推定した。

$$Z_{(half\ year)1} = Z_{(one\ year)1} - Z_{(half\ year)2} \quad (4)$$

$$M_1 = Z_{(half\ year)1} - F_1 \quad (5)$$

$Z_{(one\ year)t}$ は, N_t を用いて以下の式で推定した。

$$Z_{(one\ year)t} = -\ln \frac{N_{t+2}}{N_t} \quad (t=1, 2) \quad (6)$$

2 期と 3 期の F_t は, $Z_{(one\ year)2}$ から自然死亡係数を除いた, 1 年間の漁獲係数に相当する量に, それぞれの漁期中に漁業により死亡する割合を乗じて推定した。

$$F_t = (Z_{(one\ year)2} - M_2 - M_3) \times \frac{(P_t \times A_t)}{P_2 \times A_2 + P_3 \times A_3} \quad (t=2, 3) \quad (7)$$

2 期と 3 期以外の F_t は, エビ漕ぎ網の期間が F_2 , 桁網の期間が F_3 を基準として, 以下の式で推定した。

$$F_t = F_2 \times A_t / A_2 \quad (t=4, 6) \quad (8)$$

$$F_t = F_3 \times A_t / A_3 \quad (t=1, 5, 7) \quad (9)$$

ここで, P_2 は, 2 期から 3 期の 1 年間に, エビ漕ぎ網により漁獲される割合で, P_3 は, 同期間に桁網で漁獲される割合を示す。これらは, 両漁法の試験操業による入網尾数の比率 (エビ漕ぎ網の入網尾数/桁網の入網尾数) 0.6 と,¹⁴⁾ 福岡県の標本船の 1 年間の曳網回数の比率 (エビ漕ぎ網の曳網回数/桁網の曳網回数) 0.87 より, P_2 を 0.34, P_3 を 0.66 とした。また, A_t は, t 期に入網した後, 投棄または水揚げにより死亡する個体の割合で, 漁業による死亡のうち水揚げ対象サイズである体長 93 mm (全長 100 mm) 以上の個体の割合 δ_t と, 水揚げ対象サイズに満たないため投棄されたときの死亡率 D_t を使用し, 以下の式で推定した。

$$A_t = \delta_t + (1 - \delta_t) \times D_t \quad (10)$$

δ_t は, t 期の平均 L_t , 分散 σ^2 の正規分布で, 体長 93

mm 以上の割合より求めた。

$$\delta_i = \int_{93}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-L_i)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (11)$$

L_i は t 期の平均体長 (mm) で, 1 期と 3 期がそれぞれの期間の 2007 年級群の $\mu_{i,y,m}$ の平均, 2 期が体長組成のモードの平均, 4 期以降が 1990 年代の体長組成を使用して推定した。⁷⁾ D_i は, エビ漕ぎ網の期間が 0.9, 桁網の期間が 0.3 とした。⁶⁾

YPR と %SPR 着底以降の漁獲圧の削減による, 漁獲量と産卵量の増加の効果を評価するため, YPR と, 漁業がないときの SPR に対する, 漁業があるときの SPR の比 (%SPR) の関係を求めた。各期について, F_i を半減させるか否かを組み合わせた管理方策の YPR と %SPR を比較した。

YPR は, 加入後に入網し投棄される時期を経て, 水揚げされるプロセスを考慮し, 以下の式で定義した。

$$YPR = \sum_{i=1}^7 \frac{\delta_i F_i}{F_i + M_i} (1 - \exp(-F_i - M_i)) S_{(CSR)t} W_t \quad (12)$$

$S_{(CSR)t}$ は, 1 期から t 期の始めまでの累積生残率で, 以下の式で推定した。

$$S_{(CSR)t+1} = S_{(CSR)t} \exp(-F_t - M_t) \quad (S_{(CSR)1} = 1) \quad (13)$$

t 期の体重 W_t (g) は, (1) 式に L_t を代入し推定した。

SPR は, シャコの成熟期間が春から夏にかけて数ヶ月継続することから,¹⁰⁾ 1 期に対する t 期の累積生残率の平均 $\bar{S}_{(CSR)t}$ を用い, また, t 期における抱卵数 E_t (個) を産卵量の指標とし, 以下の式で推定した。

$$SPR = \sum_{i=1}^7 \bar{S}_{(CSR)i} E_i U_i \quad (14)$$

$$\bar{S}_{(CSR)t} = \frac{S_{(CSR)t}}{Z_t} (1 - \exp(-F_t - M_t)) \quad (15)$$

E_t は, 抱卵数と頭胸甲長の関係式¹⁶⁾に, 頭胸甲長と体長の関係式¹⁷⁾を代入した以下の式より推定した。

$$E_t = 0.04548 (0.2265 L_t^{1.0145})^{4.234} \quad (16)$$

U_i は, t 期における成熟率で, 着底翌年の 2 期を 0.4,¹⁰⁾ 4 期と 6 期を 1.0,⁴⁾ それ以外の期間を 0 とした。

YPR と %SPR 解析において, M_i と直接推定できない 4 期以降の F_i の不確実性を考慮し, 感度解析を行った。それぞれの推定値が 0.5 倍, 1.5 倍のとき, 解析結果に及ぼす影響を評価した。

結 果

標本 2007 年 4 月～2009 年 4 月にかけ, 5,369 個体のシャコが採捕された。このうち 4,674 個体について体長と体重を測定した。雌雄を合わせた体長と体重の範囲は, 20～137 mm と 0.1～33.1 g で, 平均は 59.7 mm と 4.5 g だった。2008 年 11 月に採捕された個体のうち,

695 個体は尾数のみを計数した。各月の体長組成の推移を Fig. 4 に示す。このうち, 2008 年 11 月の体長未測定個体は, 同月の体長測定個体の組成に比例配分した。体長と体重の関係から推定したアロメトリー式は,

$$W = 1.96 \times 10^{-5} \times L^{2.96} \quad (17)$$

で α と β の標準誤差は, それぞれ 5.31×10^{-7} と 6.03×10^{-3} だった。 y 年 m 月の 1 km² あたりの採捕尾数 $B_{y,m}$ を Table 1 に示す。 $B_{y,m}$ は 2007 年 11 月が最大の 34,349 尾 (km⁻²) で, 平均 5,297 尾 (km⁻²) だった。

年級群の分離 2007 年 7 月と 10 月, 2008 年 8 月に, 前月まで出現していない 20～40 mm の個体群が確認できたことから, これらを着底群と判断した (Fig. 4)。2007 年に出現した群のうち 10 月のものは, 2009 年 4 月まで 1 年半, 連続して成長を追跡することが可能であった。桁網での調査期間の体長組成を 3 つの正規分布に分解したところ, 平均が 48.3～58.8 mm, 61.4～84.2 mm, 89.7～118.1 mm の群に分離できた (Table 2)。なお, $p_{i,y,m} = 0$ や $\mu_{i,y,m} = \mu_{j,y,m}$ ($i \neq j$) と推定される月があったため, 4 群以上には分離出来なかった。体長組成の推移から, 1 期の $i=1$ の群を 2007 年級群と判断した。2期については, 採捕数が少なく明瞭なモードが確認できない月があるが, 5 月から 8 月にモードが 62.5 mm から 82.5 mm に変化しており, それ以降の 3 期の $i=2$ の群に続くかと判断した。2007 年級群の $p_{1,y,m}$, $p_{2,y,m}$ の点推定値は, それぞれ 0.87～0.98, 0.32～0.59 で, $\mu_{1,y,m}$, $\mu_{2,y,m}$ の点推定値は, それぞれ 48.3～52.8, 78.7～84.2 だった。

全減少係数 1 期と 2 期から 1 年間の全減少係数 $Z_{(one\ year)1}$, $Z_{(one\ year)2}$ は, それぞれ 2.01 と 2.06 だった。 $Z_{(half\ year)t}$ と, その推定に用いたパラメータを Table 3 に示す。 F_1 は 0.47 で, 着底直後の 1 期から漁獲の影響を受けていることを示している。なお, L_2 の推定において, 2009 年に欠測だった 9 月と, 採捕個体数の少なかった 10 月のモードは, 8 月と 11 月のモードと等しい 82.5 mm と仮定し計算した。成長の速い個体では 3 期に, また, 4 期以降はほぼ全個体が水揚げ対象サイズに達する。加入後 1 年間の生残率は 13.4% で, 着底個体の多くが水揚げ対象サイズに到達する前に死亡していた。

YPR と %SPR 現状の YPR と %SPR はそれぞれ, 0.85 g と 10% だった。1～4 期の各期と, δ_i が 1.0 の 5～7 期をまとめた期間について, 各期の F_i を半減させるか否かを組み合わせた, 32 通りの管理方策の YPR と %SPR の値と, その順位を Table 4 に示す。YPR は $F_1 \sim F_4$ を全て削減させる方策が最大で, 現状の 2.3 倍となった。%SPR は全期間の漁獲圧を削減させたとき最大で, 現状の 2.6 倍となるが, $F_1 \sim F_4$ のみの削減でも現状の 2.3 倍となった。YPR が高い上位 4 つの方策は $F_1 \sim F_3$ の削減を含み, 上位 11 の方策は F_2 の削減を含

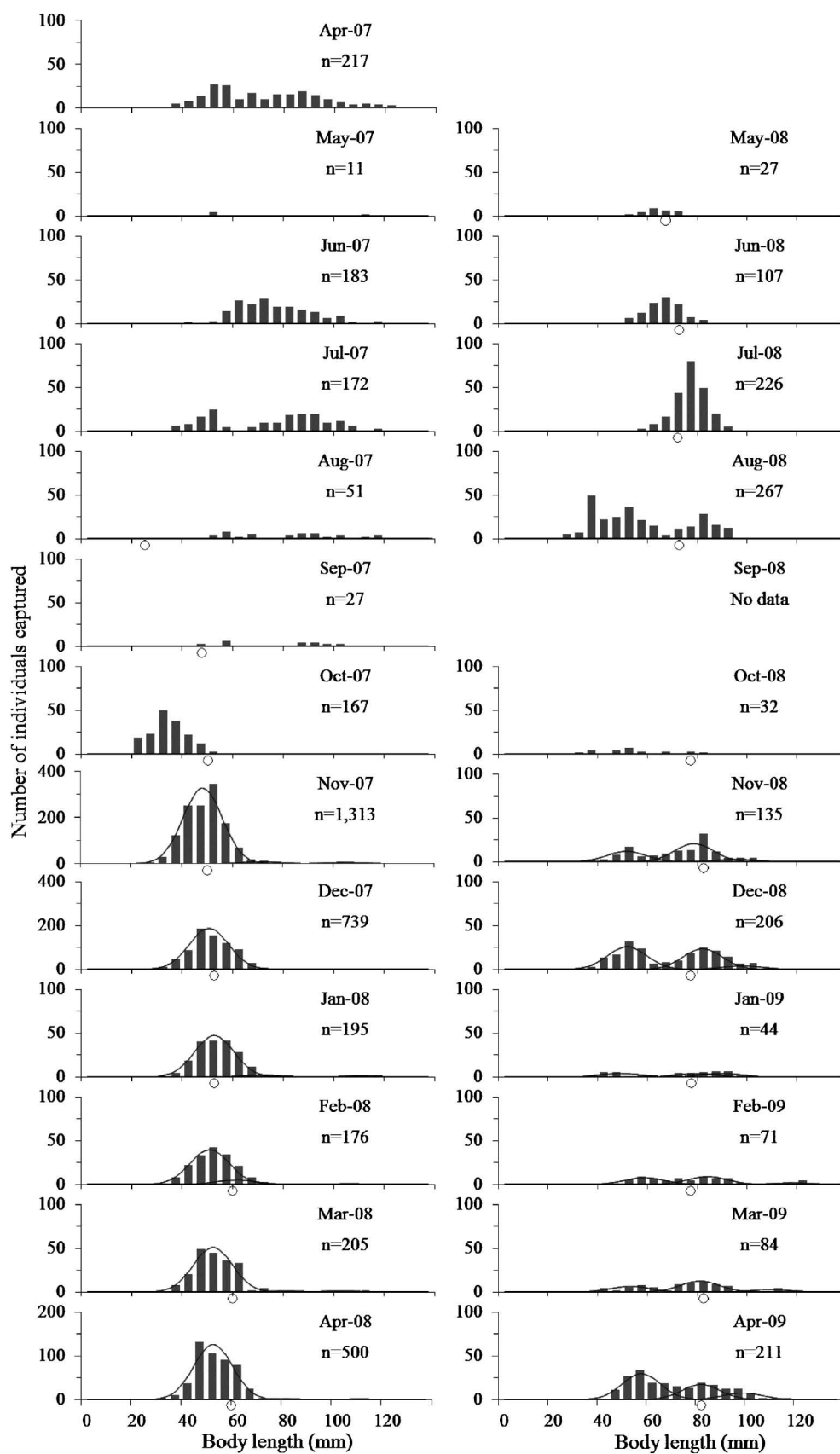


Fig. 4 Monthly length compositions of Japanese mantis shrimp captured by trawl net in the Buzen Sea, Seto Inland Sea. Solid lines indicate year classes. Open circles show the mean growth pattern of the 1990s.⁷⁾

Table 1 Individuals of mantis shrimp per square kilometer in the Buzen Sea, Seto Inland Sea

Year (y)	Month (m)	$B_{y,m}$ (ind. km ⁻²)	Year (y)	Month (m)	$B_{y,m}$ (ind. km ⁻²)
2007	4	6,180	2008	4	14,999
2007	5	90	2008	5	223
2007	6	1,497	2008	6	1,116
2007	7	1,391	2008	7	2,141
2007	8	437	2008	8	2,344
2007	9	452	2008	9	no data
2007	10	1,252	2008	10	372
2007	11	34,349	2008	11	7,593
2007	12	20,526	2008	12	5,652
2008	1	5,484	2009	1	1,165
2008	2	4,714	2009	2	1,925
2008	3	5,068	2009	3	2,305
			2009	4	5,861

むものだった。 $F_1 \sim F_4$ の削減させる期間の組み合わせによらず、 $F_5 \sim F_7$ を削減させることで、YPRは最小になるが%SPRは最大となり、逆に $F_5 \sim F_7$ を削減させないと、YPRは最大になるが%SPRは最小になる共通の傾向が見られた。また、 F_5, F_6, F_7 をまとめずに、それぞれ F_i を削減させるか否かを組み合わせた管理方策のYPRと%SPRは、 $F_5 \sim F_7$ を同時に削減させる場合と、させない場合の中間の値であった。 M_t と、4期以降の F_t を変化させたときの感度解析の結果をTable 4に示す。 M_t や F_t の値の大小によらず、管理方策とYPR、%SPRの関係は大きく変動していない。

考 察

2007年は7月と10月に、前月には見られないモードの小さな群の出現が確認できる(Fig. 4)。飼育実験においては、体長20 mmほどで着底した個体が、その直後から10日ほどの間隔で脱皮を繰り返し、2ヶ月で体長40 mm近くまで急激に成長する。¹²⁾ また、天然海域でも着底直後に同様の体長の増加が見られる。^{5,7)}

Table 2 Estimated i th normal distribution values of Japanese mantis shrimp in the Buzen Sea, Seto Inland Sea. The 95% confidence intervals are shown in parentheses

Year (y)	Month (m)	$i=1$	$i=2$	$i=3$
average ($\mu_{i,y,m}$)				
2007	11	48.3 (47.8–48.7) *1	71.6 (67.9–75.7)	104.9 (101.4–108.3)
2007	12	50.6 (50.1–51.2) *1	79.3 (72.1–87.7)	107.1 (99.8–114.3)
2008	1	52.7 (51.6–53.9) *1	70.9 (63.4–80.3)	110.6 (103.9–117.2)
2008	2	50.9 (49.6–52.2) *1	61.4 (55.0–67.0)	106.3 (97.7–114.9)
2008	3	52.2 (51.1–53.3) *1	81.5 (67.9–94.2)	102.8 (94.8–111.8)
2008	4	52.8 (52.2–53.5) *1	81.3 (73.9–89.9)	111.8 (105.2–118.2)
2008	11	51.5 (49.0–54.1)	78.7 (76.7–80.7) *3	95.7 (89.4–102.2)
2008	12	51.8 (50.2–53.4)	82.1 (80.2–84.1) *3	98.2 (93.1–103.8)
2009	1	49.0 (45.0–53.0)	79.9 (73.4–85.3) *3	89.7 (84.8–94.9)
2009	2	58.8 (55.6–61.9)	84.2 (81.2–87.2) *3	118.1 (112.1–124.1)
2009	3	53.2 (49.8–56.6)	81.0 (78.6–83.5) *3	109.5 (104.0–115.4)
2009	4	58.1 (56.5–59.6)	82.3 (79.5–85.0) *3	99.3 (95.9–102.9)
proportion ($p_{i,y,m}$)				
2007	11	0.96 (0.95–0.97) *1	0.02 (0.01–0.03)	0.01 (0.01–0.02)
2007	12	0.98 (0.97–0.99) *1	0.01 (0.01–0.02)	0.01 (0.00–0.01)
2008	1	0.94 (0.88–0.97) *1	0.04 (0.01–0.09)	0.03 (0.01–0.05)
2008	2	0.87 (0.78–0.95) *1	0.11 (0.02–0.22)	0.02 (0.00–0.04)
2008	3	0.96 (0.92–0.98) *1	0.02 (0.00–0.05)	0.02 (0.01–0.05)
2008	4	0.97 (0.96–0.99) *1	0.01 (0.01–0.03)	0.01 (0.00–0.02)
2008	11	0.33 (0.25–0.42)	0.59 (0.49–0.68) *3	0.08 (0.03–0.15)
2008	12	0.48 (0.41–0.55)	0.44 (0.37–0.52) *3	0.07 (0.03–0.13)
2009	1	0.34 (0.21–0.49)	0.32 (0.14–0.53) *3	0.34 (0.15–0.54)
2009	2	0.42 (0.30–0.54)	0.49 (0.36–0.61) *3	0.10 (0.04–0.18)
2009	3	0.30 (0.20–0.40)	0.58 (0.46–0.69) *3	0.13 (0.06–0.21)
2009	4	0.54 (0.47–0.61)	0.32 (0.24–0.40) *3	0.14 (0.09–0.21)
variance (σ^2)			57.19 (54.44–60.12)	

*1 and *3 indicate the 1st and 3rd period of the 2007 year class.

Table 3 Parameter values of total mortality coefficient ($Z_{(half\ year)t}$), fishing mortality coefficient (F_t), natural mortality coefficient (M_t), capture in number (N_t), mean length (L_t), ratio of individuals 93 mm or larger (δ_t), cumulative survival rate ($S_{(CSR)t}$), and mortality rate by landing and discarding (A_t) for each period t of the 2007 year class of Japanese mantis shrimp in the Buzen Sea, Seto Inland Sea

t	$Z_{(half\ year)t}$ (0.5 year ⁻¹)	F_t (0.5 year ⁻¹)	M_t (0.5 year ⁻¹)	N_t (ind. km ⁻²)	L_t (mm)	δ_t	$S_{(CSR)t}$	A_t
1	0.88	0.47	0.41	33,131	51.3	0.00	1.000	0.30
2	1.13	0.73	0.40	14,597	75.8	0.01	0.414	0.90
3	0.94	0.54	0.40	4,445	81.4	0.06	0.134	0.34
4	1.20	0.80	0.40	1,852	103.3	0.91	0.053	0.99
5	1.97	1.57	0.40		120.8	1.00	0.016	1.00
6	1.21	0.81	0.40		130.0	1.00	0.002	1.00
7	1.97	1.57	0.40		137.5	1.00	0.001	1.00

Table 4 Yield per recruit (YPR) and percent spawning per recruit (%SPR) values of each management policy and sensitivity analyses of YPR and %SPR with low and high natural mortality coefficients and fishing mortality coefficients for Japanese mantis shrimp in the Buzen Sea, Seto Inland Sea. Square brackets show ranking of YPR and %SPR

YPR (g)	%SPR	Management policy (periods of reduction in fishing effort)				Sensitivity YPR (g), %SPR			
						$M \times 1.0$ $F_4-F_7 : \times 1.5$	$M \times 1.0$ $F_4-F_7 : \times 0.5$	$M \times 1.5$ $F_4-F_7 : \times 1.0$	$M \times 0.5$ $F_4-F_7 : \times 1.0$
1.93 [1]	23% [2]	1	2	3	4	1.98, 20%	1.67, 29%	1.13, 36%	3.37, 14%
1.90 [2]	20% [6]	1	2	3		1.93, 17%	1.69, 26%	1.17, 32%	3.15, 12%
1.74 [3]	22% [3]	1	2	3	5, 6, 7	1.85, 18%	1.37, 29%	1.06, 34%	2.93, 14%
1.69 [4]	26% [1]	1	2	3	4	1.84, 22%	1.28, 33%	0.97, 39%	3.05, 17%
1.56 [5]	19% [8]	1	2		4	1.60, 17%	1.36, 23%	0.98, 32%	2.50, 11%
1.53 [6]	17% [14]	1	2			1.55, 15%	1.37, 21%	1.01, 29%	2.34, 9%
1.53 [7]	18% [10]		2	3	4	1.57, 16%	1.32, 23%	0.96, 31%	2.47, 10%
1.50 [8]	16% [17]		2	3		1.52, 14%	1.34, 21%	0.99, 27%	2.31, 9%
1.41 [9]	18% [9]	1	2		5, 6, 7	1.49, 16%	1.13, 24%	0.92, 31%	2.19, 11%
1.38 [10]	18% [11]		2	3	5, 6, 7	1.46, 15%	1.08, 23%	0.90, 29%	2.15, 10%
1.37 [11]	21% [4]	1	2		4	1.49, 19%	1.06, 26%	0.85, 35%	2.27, 13%
1.36 [12]	17% [13]	1		3	4	1.39, 15%	1.17, 21%	0.89, 30%	2.11, 9%
1.34 [13]	21% [5]		2	3	4	1.46, 18%	1.01, 26%	0.82, 33%	2.24, 13%
1.33 [14]	15% [20]	1		3		1.35, 13%	1.19, 19%	0.92, 27%	1.97, 8%
1.23 [15]	15% [19]		2		4	1.26, 13%	1.07, 18%	0.84, 27%	1.83, 8%
1.22 [16]	16% [15]	1		3	5, 6, 7	1.30, 14%	0.97, 21%	0.83, 28%	1.84, 9%
1.21 [17]	13% [25]		2			1.23, 12%	1.09, 17%	0.86, 24%	1.72, 7%
1.19 [18]	19% [7]	1		3	4	1.30, 17%	0.90, 24%	0.76, 32%	1.91, 11%
1.11 [19]	15% [21]		2		5, 6, 7	1.18, 12%	0.89, 19%	0.79, 26%	1.61, 8%
1.10 [20]	14% [22]	1			4	1.12, 13%	0.95, 17%	0.77, 26%	1.57, 7%
1.09 [21]	17% [12]		2		4	1.18, 15%	0.83, 21%	0.72, 30%	1.67, 9%
1.08 [22]	13% [27]	1				1.09, 11%	0.97, 16%	0.80, 24%	1.47, 6%
1.07 [23]	13% [24]			3	4	1.10, 12%	0.93, 17%	0.76, 25%	1.55, 7%
1.05 [24]	12% [29]			3		1.07, 10%	0.94, 15%	0.78, 23%	1.45, 6%
0.99 [25]	14% [23]	1			5, 6, 7	1.05, 12%	0.80, 18%	0.73, 25%	1.38, 7%
0.97 [26]	16% [16]	1			4	1.05, 14%	0.75, 19%	0.67, 29%	1.43, 9%
0.97 [27]	13% [26]			3	5, 6, 7	1.03, 11%	0.76, 17%	0.71, 24%	1.35, 7%
0.94 [28]	15% [18]			3	4	1.02, 13%	0.71, 19%	0.65, 27%	1.40, 8%
0.87 [29]	11% [30]				4	0.89, 10%	0.75, 14%	0.66, 23%	1.15, 5%
0.85 [30]	10% [32]	(current level)				0.86, 9%	0.77, 13%	0.68, 20%	1.08, 5%
0.78 [31]	11% [31]				5, 6, 7	0.83, 9%	0.63, 14%	0.62, 22%	1.01, 5%
0.77 [32]	13% [28]				4	0.83, 11%	0.59, 15%	0.57, 24%	1.05, 6%

Relationship of period and year after recruitment, 1: 0–0.5 year, 2: 0.5–1 year, 3: 1–1.5 year, 4: 1.5–2 year, 5: 2–2.5 year, 6: 2.5–3 year, 7: 3–3.5 year

2007 年の 10 月に出現した群は, 7 月に出現した群よりモードが小さいことと, 3 ヶ月の差があることから, 同一時期の着底群ではなく, 異なる時期のものであると判断できる。1980 年代には, 時期の異なる 2 つの規模の大きな着底群のモードを, 同時に追跡できた年もあるが,⁵⁾ 2007 年 7 月に見られた着底群は, 8 月以降モードが不明瞭で, 10 月には確認できないほど小規模なものであった。このため, 11 月以降の 2007 年級群は, 10 月から出現した群が中心の 1 つのモードで形成されている。2007 年級群を追跡すると, 11~4 月の期間にかけて $i=1$ や $i=2$ の群に成長の停滞が見られるのに対し, 4 月の $i=1$ から 11 月の $i=2$ にかけては, $\mu_{i,y,m}$ が 25 mm ほど増加している (Table 2, Fig. 4)。成長が停滞する水温が低い冬期の脱皮の有無は不明であるが, 飼育実験では, 水温が 25 度の環境下で 1~2 ヶ月ほどの間隔で, 脱皮を繰り返し成長することから,¹²⁾ 水温が高くなる 4~11 月にかけては, 数回の脱皮を行い成長するものと考えられる。また, 2008 年級群は 8 月に 1 回着底が認められ, 2008 年 11 月から 2009 年 4 月にかけての $i=1$ の群には, 2007 年級群の $i=1$ の群と同様に成長の停滞が見られる。着底後 1 年半までの間に見られる, 成長の季節変動や到達する体長は, 1990 年代前半⁷⁾ とほぼ一致してもおり (Fig. 4), 当時と比較し成長の変化は起きていないと推察される。

YPR や SPR の計算には, 1 個体あたりの体重や体長の情報が必要となるが, 4 期以降の L_t を, 年級群の追跡から直接推定できなかった。1980 年代後半や 1990 年代前半の知見では, 最大で平均 140 mm の群が確認できるが,^{5,7)} 本研究では, $i=3$ の群でも最大 118 mm にとどまっている。しかしながら, 本研究でも, 最大で 137 mm の個体が確認できることから, 過去と比較し, 高齢個体の到達する体長が小型になったのではなく, 高齢個体の数が少なくモードを検出できないと判断した。また, 3 期までの成長は, 1990 年代前半の成長の推移⁷⁾ とほぼ一致しており, 4 期以降も同様に推移していると想定し, 1990 年代前半の体長の情報を使用した。この情報は雌雄別に体長組成が得られないため, 本研究でも雌雄込みで解析を実施した。YPR と SPR の計算に必要な体長は, 半年ごとの情報であり, 各期の間で 10~20 mm ほど成長する (Table 2)。しかし, 1980 年代後半の周防灘で Hamano and Morrissy⁵⁾ が推定した, von Bertalanffy 成長式や Pitcher & MacDonald 成長式での雌雄の極限体長の差は 2 mm 以下で, 期間の差と比べ, 雌雄の成長差の影響は小さいと考えた。なお, 期間 t は漁期と漁法を考慮し設定したが, 5~10 月と 11~4 月は, それぞれ成長の盛んな時期と, 停滞する時期とも一致している。この区分は YPR や SPR の計算において, シャコの成長の季節変動を, 十分に反映していると

考えられる。

単位面積あたりの個体数は, その年の新規の着底が完了し, 漁獲効率が低い桁網に切り替わる 11 月が最大となり, その後急激に減少する (Table 1)。1~4 月は全て桁網の調査期間であるが, 1~3 月の $B_{y,m}$ は, 4 月の $B_{y,m}$ よりも少ない。この傾向は, 過去にも報告されている冬期の活動低下の影響と考えられる。⁷⁾ その年の新規着底個体が出現する直前で, 前年までの着底群で形成されていると考えられる, 1993 年 7 月のエビ漕ぎ網による試験操業での単位面積あたりの採捕尾数は 21,773 尾 km^{-2} で¹⁸⁾ 同様に前年までの着底群で形成されていると考えられる 2008 年 7 月の $B_{2007,4} = 2,141$ と比較すると, 生息密度は 15 年間で 1 割に低下していた。また, 1980 年代後半から 90 年代前半の体長組成には, 本研究で得られた体長組成では分離できなかった, 4 つ目の年級群も存在していることから,^{5,7)} 現在より高齢まで生き残る個体も多かったものと推察される。現在の豊前海は, 1990 年代前半と比較し, 資源の生息密度が大幅に低下していることに加え, 年齢構成も若齢化している。

2007 年級群の漁獲係数の推定結果は, 1~3 期に水揚げ対象サイズに満たないシャコの投棄による死亡が含まれていることを示している (Table 3)。この期間では 2 期のエビ漕ぎ網の F_t の方が, 1 期と 3 期の桁網の F_t より高い傾向が見られる。漁獲効率はエビ漕ぎ網より桁網の方が高いが, エビ漕ぎ網が操業する夏期の投棄による死亡率が冬期より高いため,⁶⁾ 1 期と 3 期よりも高い F_t となっている。

月ごとの成長を追跡すると, 2007 年 10 月から 2008 年 8 月まで, 水揚げ対象サイズのシャコがほとんど採捕されていない時期がある (Fig. 4)。標本船 CPUE も同時期に, 非常に低調に推移している (Fig. 3)。しかし, 2007 年級群の一部が, 水揚げ対象サイズに達する 2008 年 10~12 月に, わずかではあるものの再び CPUE が上昇していることから, 水揚げ対象サイズに達した個体がすぐに漁獲されている実態を表しているものと考えられる。

シャコは, 産卵から着底までの浮遊幼生の時期と, 着底後の底生生活の時期の 2 つの異なる生活ステージをもつ。現状の漁獲形態を続けたとしても, 着底量が増加すれば, 漁獲や産卵まで生残する個体の増加が期待できる。着底量は, 産卵量に加え, 浮遊幼生期間の貧酸素水塊の有無,¹⁹⁾ 塩分濃度,²⁰⁾ 河川水や表面水温²¹⁾ など様々な環境要因が影響すると示唆されている。産卵量と着底量の間には, これらの要因の変動のため, 量的対応が見られない年もある。¹⁹⁾ しかし, 浮遊幼生の期間にかかる環境要因をコントロールすることは極めて困難なため, 人為的な取り組みで着底量の増加につながる可能性がある方策は, 産卵量を増大させることである。

YPR, SPR 解析の結果は、現状の漁業の影響を軽減させることで、漁獲量、産卵量いずれも改善できる余地があることを示唆している (Table 4)。YPR と %SPR の双方の増加を目的とした場合、水揚げ対象サイズ未満である 1, 2, 3 期の漁獲圧を削減する方策の効果が大きい。また、1~3 期の一部を削減する場合では、2 期の漁獲圧の削減を含む方策が、YPR と %SPR を増加させる効果が大きい。これらの結果は、水揚げ対象サイズ未満の個体の投棄による死亡が、漁獲量や産卵量に影響を及ぼすことを示し、特に着底翌年の夏場の投棄による死亡の影響が大きいことを示唆している。さらに、1~3 期の漁獲圧の削減を含むいずれの方策でも、同時に 4 期も削減した方が、YPR と %SPR 双方を増加させる傾向が見られる。4 期は産卵期を含んでいることと、水揚げ対象サイズに達しているが、成長による体重の増加が死亡による個体の減耗を上回るためと考えられる。一方で 1~4 期の漁獲圧の削減の組み合わせた管理方策に、5~7 期の削減を加えると、%SPR は増加する反面、YPR が低下するトレードオフの関係が見られることから、この期間の漁獲圧の削減は、漁獲量増大につながらないことを示している。

現在の豊前海のシャコは生後 1 年で 4 割程度、生後 2 年目から本格的に産卵に加わる。また、現状では加入直後から投棄が始まり、夏場の投棄による死亡も大きい。成長の速い個体では、生後 1 年目の秋に水揚げ対象サイズに達するため、未成熟の段階で、投棄や水揚げされ死亡してしまう個体も多い。このため、本海域でシャコの漁獲量の増大と、資源回復のため産卵量の増大の双方を目指すには、1~4 期までの漁獲圧の削減が効果的であり、特に着底翌年の夏場である 2 期の投棄による死亡の抑制が重要である。

豊前海の小底漁業は、シャコ以外にもカレイ類や小型エビ類など、多様な資源を漁獲対象としている。小型個体の入網を防ぐため、保護区の設置や、漁具の目合を拡大するなど、シャコのみならず主眼をおいた管理方策を実施した場合、他の魚種の漁獲量を減少させる可能性が考えられる。しかし、現在、資源が減少傾向であるマコガレイにおいても、若齢魚の投棄後の生残率が 0 であることから、資源回復のためには若齢魚の入網と投棄を極力防ぐ保護策の必要性が指摘されている。²²⁾ また、周年の漁具の目合拡大などは困難であっても、短期的な目合の拡大で、水揚げ対象サイズ以下のシャコと、小型エビ類の未成熟個体の入網を減少できる可能性も指摘されている。¹³⁾ 未成熟個体の入網と投棄による減耗を抑制することは、豊前海の重要な漁獲対象資源に共通する課題である。加えて、多魚種を考慮し適応可能な管理方策を検討していくことも今後の重要な課題である。当海域のシャコ資源の増大には、小底の操業形態や、他の資源の生物

学的特性も考慮する必要があるが、水揚げ対象サイズに満たない個体の漁獲の抑制につながる対策に取り組むことが急務である。

謝 辞

シャコの採捕に際し、多大なご協力を頂きました、豊築漁業協同組合の内丸義彦氏に深謝いたします。本論文の作成にあたり有益な助言を頂いた、富山県農林水産総合技術センター水産研究所の銭谷 弘博士、瀬戸内海区水産研究所の小畑泰弘博士に深く感謝いたします。本研究の一部は水産庁の委託による「我が国周辺水域資源調査推進委託事業」により実施しました。

文 献

- 1) 有江康章, 徳田眞孝, 濱田弘之, 上妻智行. 福岡県豊前海産シャコの漁業生物学的研究-I 分布と活動時間について. 福岡県水試研報 1991; 4: 11-21.
- 2) 上妻智行, 有江康章, 濱田弘之, 石田雅俊. 資源管理型漁業推進総合対策事業(2)地域重要資源調査-I (豊前海中部地区, シャコ). 平成 4 年度福岡県水産海洋技術センター事業報告, 福岡県水産海洋技術センター, 福岡. 1993; 381-387.
- 3) Tokai T, Ito H, Masaki Y, Kitahara T. Mesh selectivity curves of a shrimp beam trawl for southern rough shrimp *Trachypenaeus curvirostris* and mantis shrimp *Oratosquilla oratoria*. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1990; 56: 1231-1237.
- 4) 有江康章, 徳田眞孝, 濱田弘之, 上妻智行. 福岡県豊前海産シャコの漁業生物学的研究-II 性比と成熟について. 福岡県水試研報 1991; 4: 23-33.
- 5) Hamano T, Morrissy NM. Growth of *Oratosquilla oratoria* (De Haan, 1844) (Stomatopoda) in the Sea of Suo-Nada, Japan. *Crustaceana* 1992; 63: 263-276.
- 6) 上妻智行, 有江康章, 宮本博和. 小型底びき網で漁獲されるシャコの投棄後死亡率の推定. 福岡水技研報 1993; 1: 85-88.
- 7) 上妻智行, 徳田眞孝. 豊前海におけるシャコの成長・成熟および漁獲実態. 福岡水試研報 1995; 4: 25-31.
- 8) Kubo I, Hori S, Kumemura M, Naganawa M, Soedjono J. A biological study on a Japanese edible mantis shrimp, *Squilla oratoria* De Haan. *J. Tokyo Univ. Fish.* 1959; 45: 1-25.
- 9) 田中栄次. 資源評価と管理のあり方. 「エビ・カニ類資源の多様性」(大富潤, 渡邊精一編) 恒星社厚生閣, 東京. 2003; 109-117.
- 10) 石谷 誠, 亘 真吾, 尾田成幸. 豊前海におけるシャコの成熟と体長の関係. 福岡水海技セ研報 2010; 20: 17-21.
- 11) Hamano T, Matsuura S. Egg size, duration of incubation, and larval development of the Japanese mantis shrimp in the laboratory. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1987; 53: 23-39.
- 12) Hamano T, Matsuura S. Growth of the Japanese mantis shrimp of the laboratory birth. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1987; 53: 889.
- 13) 石谷 誠, 江藤拓也. 小型底びき網漁業における混獲投棄魚の実態について. 福岡水海技セ研報 2009; 19: 21-27.
- 14) 山口県, 福岡県, 大分県. 昭和 60 年度沿岸域漁業管理適正化方式開発調査事業報告書 (周防灘海域), 南西海区水産研究所, 広島. 1986.

- 15) 石岡清英, 土井長之, 林凱夫. 大阪湾のシャコ資源量の推定とその評価. 南西水研報 1981; **13**: 59–79.
- 16) Hamano T, Morrissy NM, Matsuura S. Ecological information on *Oratosquilla oratoria* (Stomatopoda, Crustacea) with an attempt to estimate the annual settlement data from growth parameters. *J. Shimonoseki Univ. Fish.* 1987; **36**: 9–27.
- 17) 浜野龍夫. 「シャコの生物学と資源管理」水産研究叢書 51 日本水産資源保護協会, 東京. 2005.
- 18) 上妻智行, 濱田豊市, 小林 信. 資源管理型漁業推進総合対策事業(4)地域重要資源調査-II (豊前海南部地区, シャコ). 平成6年度福岡県水産海洋技術センター事業報告, 福岡県水産海洋技術センター, 福岡. 1995; 371–376.
- 19) Kodama K, Oyama M, Lee J-H, Akaba Y, Tajima Y, Shimizu T, Shiraishi H, Horiguchi T. Interannual variation in quantitative relationships among egg production and densities of larvae and juveniles of the Japanese mantis shrimp *Oratosquilla oratoria* in Tokyo Bay, Japan. *Fish. Sci.* 2009; **75**: 875–886.
- 20) 児玉圭太, 山川 卓, 青木一郎, 福田雅明, 清水詢道. 東京湾産シャコの浮遊期幼生における塩分耐性. 水産海洋研究 2003; **67**: 141–147.
- 21) 児玉圭太, 清水詢道, 青木一郎. 東京湾におけるシャコ加入量の変動要因. 神水研研報 2003; **8**: 71–76.
- 22) 井本有治, 木村 博, 吉岡直樹, 銭谷 弘. 加入量当たり産卵資源量を用いた周防灘マコガレイの資源管理. 日水誌 2007; **73**: 684–692.