逸失底刺網のゴーストフィッシング能力の 経時的变化と死亡数推定

仲島 淑子, 松岡 達郎*

(2003年7月9日受付, 2004年4月8日受理)

鹿児島大学水産学部

Ghost-fishing ability decreasing over time for lost bottom-gillnet
and estimation of total number of mortality

TOSHIKO NAKASHIMA AND TATSURO MATSUOKA*

Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Kagoshima 890-0056, Japan

The ghost-fishing ability descending over time and ghost-fishing mortality were quantitatively evaluated for a lost bottom-gillnet. Three experiments were conducted for a maximum period of 1,689 days since deployment of a net. The number of ghost-fishing mortalities per day per net was determined by underwater observation of enmeshed fish on two consecutive days. Mortalities were recorded continuously around the start of experiments and intermittently during the following period. The consistent faunal character around the net was confirmed and the number of mortalities was assumed to reflect the change in the ghost-fishing ability of the net. The decline in ghost-fishing ability over time was represented by a sum of two formulae, which reflect two ghost-fishing factors effective respectively for short and long periods of time. From this analysis, the effective ghost-fishing duration which was defined as the time elapsed to the day when the value of the equation declines to 5 percent of the original fishing ability of the net was 142 days during which the total number of ghost-fishing mortalities was 455 fish. Ghost fishing for red sea bream, *Pagrus major* and jack, *Decapterus* sp. occurred in the first short period and for filefish *Stephanolepis cirrhifer*, over a longer period.

キーワード：ゴーストフィッシング, 経時的变化, 死亡数, 逸失刺網, 潜水観察

ゴーストフィッシングとは, さまざまな理由で漁業者の管理を離れた逸失漁具のうち漁獲能力を維持しているもの, すなわちゴーストフィッシング漁具が水産生物の死亡を引き起こすことと要約できる。^{1,2)} (「逸失漁具」は, lost fishing gear, derelict fishing gear, abandoned fishing gear の総称として用いている。) 海鳥³⁾や海産哺乳類⁴⁾など一般の水産生物以外の罹網や, さんご礁への纏絡,⁵⁾ 海底への蓄積,⁵⁻⁷⁾ 海岸への漂着^{5,8)}などの海洋残骸物すなわち marine debris としての海洋環境に対する影響と並んで, 逸失漁具がもたらす被害の一つである。漁具の逸失およびゴーストフィッシングは, 持続的な水産資源の利用に向けた漁業管理の視点から, 混獲⁹⁻¹²⁾や投棄^{9,12)}と並ぶ漁業の抱える無駄の一つとして1970年代から漁業研究者や漁業管理者の間で問題視されてきた。世界の漁業の開発と管理の基準としてFAOが発表

した「責任ある漁業のための行動規範」¹³⁾でも繰り返し取り上げられ, 各国が協力して問題解決に尽力するよう求められている。

ゴーストフィッシング問題は当初刺網漁業で認識され始め, 1960年にFAOが検討課題として取り上げた。¹⁾しかし, 刺網漁業でのゴーストフィッシングに関する研究はほとんど行われず, その後の研究はおもにカニ類やロブスター類などの甲殻類を対象とした籠漁業を対象として進展した。さまざまな籠漁具を対象に, スキューバ潜水による実態観察^{2,14-19)}や逸失漁具を模した操業実験²⁰⁻²²⁾などの研究が行われ, その多くは, 入り籠した動物の脱出割合や死亡数の推定から, 逸失籠によるゴーストフィッシング死亡が水産資源に深刻な影響を与える可能性を示唆した。^{2,15,17,21,22)}たとえば松岡らの籠漁業の事例研究は,^{2,18)} 漁場に存在する逸失籠数の分布がポア

ソン分布により近似できることを示すとともに、ゴーストフィッシング死亡数を推定し、(1)逸失籠の総数は操業中の籠の約12倍であり、(2)そのうちの約40%が漁獲機能を残し、(3)漁場内のタコ類の死亡量は同漁場全体での商業的水揚げ量と等量から2倍にのぼるといった、定量的評価が可能な段階にまで至っている。アラスカの籠漁業ではすでに、脱出口の取り付けや分解性の材料の使用が義務付けられるなどの対策が講じられるようになっている。²¹⁾

籠漁業に比べ、刺網によるゴーストフィッシングについては、これまで欧米での研究例がわずかにあるだけである。逸失網の分布やその状態を調べる潜水艇やROVを用いた漁場調査,²³⁾ 逸失状態を模した刺網²³⁻²⁶⁾や三重網^{25,26)}による罾網動物のスキューバ潜水観察実験が報告されている。主要な研究例であるCarr *et al.*²³⁾とCarr *et al.*²⁴⁾は模擬逸失刺網による観察日ごとの罾網や網の形状変化を、Kaiser *et al.*²⁵⁾やErzini *et al.*²⁶⁾は連続した2日間の観察から1日あたりの罾網数と浮子高さを調べた。後2者はさらに1日あたりの罾網数の経時的变化を近似する実験式を求め、逸失網による総罾網数を推定した。しかし、1日あたり罾網数の供試網設置直後の詳細な変化が調べられなかったこと、調査期間が比較的短期間であったこと、模擬逸失網周辺の水産動物の密度や種構成の変化の検討に欠けることといった不十分さもあった。

本研究では、(1)刺網のゴーストフィッシング能力が急速に変化する逸失直後の1日あたりゴーストフィッシング罾網数（以下、罾網数とする）の連続した調査、(2)罾網数が0であることが大半となる程度に長い期間の継続的モニタリング、(3)供試逸失刺網が周辺の魚群構成に変化をもたらさないことの確認などを行うことで、経過日数に伴う刺網のゴーストフィッシング能力の変化を把握できるようにするとともに、刺網によるゴーストフィッシングの定量的評価を試みた。

材料と方法

単位漁具当りの総死亡数とゴーストフィッシング継続期間を推定するために、底刺網を設置して逸失状態を模し、逸失後の罾網数の変化を観察する現場実験を行った。逸失刺網による1日あたりの罾網数を長期間調べる実験を2回（Exp. 1-1とExp. 2）と、供試網のゴーストフィッシングが実験期間中の漁具周辺の魚群密度と魚種構成ひいては罾網数に影響を与えていないことを確認する実験を1回（Exp. 1-2）、計2種類3回の実験を同一海域で行った。以下では、逸失刺網に罾網した魚類は最終的にはすべて死亡するとみなし、観察した罾網数からゴーストフィッシング死亡数を推定した。

供試網と実験水域 すべての実験で、最小60 mm か

Fig. 1 Dimensions of simulated lost-gillnet and seabed conditions where net was deployed: The net was made of PA monofilament #4 with a combination of six 12 m-long panels of mesh sizes arranged at random. Each end of the net was fixed with a sandbag.

ら最大99 mmの範囲で6段階の目合いのナイロンモノフィラメント・網糸太さ4号の網地をランダムに組み合わせ、1 mごとに余剰浮力50 gの浮子1個を取り付け、150 g/mの鉛入り沈子網を用いた、仕立てあがり長さ72 m、網丈2.3 mの雑魚底刺網1反ずつを供試網とした（Fig. 1）。目合いの異なる網を組み合わせたのは、特定のサイズの魚種に対して選択的にゴーストフィッシングが発生しないように配慮したものである。以下、上記の実験番号に従い供試網1-1、供試網2、供試網1-2と呼ぶ。これらを鹿児島県下の沿岸漁場（Fig. 2）の、距岸約160 mから210 m、水深15 mから21 mの海底に、両端を土俵で固定して設置した。刺網周辺の底質は岩場（陸側）と砂場（沖側）が相半ばしていた。供試網の水中での展張、回収とともに潜水作業で行い、漁船の航行や波浪外力による漁具の移動、破損を避けるため浮標等は用いなかった。実験漁場は生簀養殖業と雑魚籠漁業が行われている水面であった。

1日あたりの罾網数の潜水観察 1998年7月15日に供試網1-1を設置し、2003年2月28日までの1,689日間海底に放置した（Exp. 1-1）。その間のある連続した2日間の水中観察を1回のサンプリングとし、1日目に罾網していたすべての魚に標識（商品名US-25 mm、日本バノック社製）を取り付けて残置し、2日目の観察で標識のなかった罾網魚を1日あたりのゴーストフィッシング罾網魚（以下、罾網魚とする）として、魚種ごとに記録した。ただし、供試網設置1日後だけは罾網した魚すべてを1日あたりの罾網魚とみなし、これを1回のサンプリングとした。網設置日を含む実験当初16日間は連続して15回、その後は異なる間隔をあけて計68回のサンプリングを行った。Exp. 1-1で罾網数が0である場合が多くなり、供試網1-1のゴーストフィッシング能力がほぼ喪失したと判断できた2002年9月5

日に、供試網 1-1 と平行にこれから 1 m 以内の非常に近接した場所に、上記と同様の方法で供試網 2 を設置し、2003 年 2 月 28 日までの 176 日間放置した (Exp. 2)。連続する 2 日を単位とする 1 日あたり罹網数の調査法は Exp. 1-1 と同じで、実験当初は連続して 19 回、その後は異なる間隔をあけて計 39 回のサンプリングを行った。

実験継続中の供試漁具周辺の魚群構成の確認実験 供試網によるゴーストフィッシングの影響により供試網周辺の魚群構成が変化する可能性があったので、この可否を確認する実験を行った。Exp. 1-1 開始から 78 日後の 1998 年 10 月 1 日に、供試網 1-2 を供試網 2 と同様に設置した (Exp. 1-2)。設置直後に連続して 2 回のサンプリングを Exp. 1-1 および Exp. 2 と同じ方法で行った。供試網 1-2 は Exp. 1-2 終了後に回収した。サンプリングを設置直後の 2 回に限ったのは、長期浸漬による外乱をできるだけ排し、3 反の漁獲能力が同じとみなせる程度に短期間の罹網数と種を比較することで、漁場での魚群構成の変化の有無を調べようとしたものである。

ゴーストフィッシング能力の経時的変化と死亡数推定 供試網による 1 日あたりの罹網数はその網のゴーストフィッシング能力を代表していると考え、これを罹網数/日と表す。Kaiser *et al.*²⁵⁾ と Erzini *et al.*²⁶⁾ の罹網数/日の経時的低下の近似式は、それぞれ $N_t = At^a$ ($0 < a$)、 $N_t = Ab^t$ ($0 < b < 1$) に帰せられ、どちらの場合も経過日数 t を用いた 1 項の減少関数で表した。ここで罹網数/日の初期値 A は、網設置後 0 日目のゴーストフィッシング能力を代表していると見なせる。 a , b はゴーストフィッシング能力の低下率に関係する定数である。後述するように、これらのモデルでは本研究で見られたゴーストフィッシング能力の初期の急速な低下を表現できなかった。

本研究では、刺網のゴーストフィッシング能力の低下要因と考えられる、付着物の増加による視認性の増大^{26,27)}と、網高きの減少などによる有効漁具面積の減少^{25,26)}の両者の発現に要する期間が異なるとともに、実験経過とともに罹網魚種に変化が見られたことから、これらの要因を別個に取り扱うべきであると考えた。ゴーストフィッシング能力はその要因ごとに初期能力から経過日数に従って一定の割合で低下するとし、 t 日目のゴーストフィッシング能力 N_t を $N_t = A_1(1-r_1)^t + A_2(1-r_2)^t$ という 2 項の和で近似することを試みた。ここで、 A_1 と A_2 は各要因による罹網数/日の初期値で、 r_1 と r_2 は網逸失後の経過日数に伴う各要因によるゴーストフィッシング能力低下率である ($r_1 > r_2$)。網設置から 1 日後までの罹網数を供試網の初期能力としたので、この日を逸失後の経過日数 0 日目とした。

MS-Excel の最適化ソフトであるソルバー^{28,29)}を用い、全実験での全魚種の 1 日あたりの罹網数から最小二乗法により A_1 と A_2 および r_1 と r_2 を求めた。さらに、罹網継続期間の差により魚種を 2 群に分類し、各群の全実験での罹網数から上記と同様にして近似式を求めた。これらの近似式をもとに、全魚種および 2 魚種群に対するゴーストフィッシング能力低下の差を検討するとともに、ゴーストフィッシング継続期間とその間の総死亡数、日平均死亡数を推定した。

結 果

ゴーストフィッシング魚種および罹網数 全実験を通して、魚類計 31 種 376 尾の罹網を観察した (Table 1)。Exp. 2 でワタリガニ *Portunus pelagicus*、イシガニ *Charybdis japonica* などのカニ類 4 個体が罹網したが、魚類と甲殻類ではゴーストフィッシングの発生メカニズムや罹網後の死亡率に差がある可能性を考慮し、かつ甲殻類の資料数が少なかったため、以下では魚類のみを分析対象とした。おもな罹網魚種はカワハギ *Stephanolepis cirrhifer*、ネズミゴチ *Repomucenus richardsonii*、マダイ *Pagrus major* で、それぞれ全罹網数の 31%、17%、11% であった。Exp. 1-1 でのおもな魚種はネズミゴチ、カワハギ、マダイで、Exp. 1-1 で観察した合計罹網数 96 尾のそれぞれ 30%、15%、14% であった。Exp. 2 でのおもな魚種はカワハギ、ネズミゴチ、カサゴ *Sebastes marmoratus* で、Exp. 2 で観察した合計罹網数 252 尾のそれぞれ 39%、14%、9.5% であった。

カワハギが罹網魚や付着物を啄ばんだり (Fig. 2)、カサゴが着底している網地の上に滞留しているなど、これらの種が逸失網近傍を生活の場としているのが観察できた。カワハギ、カサゴの多くは、岩などに纏絡した網地と海底の間に 20 cm 以下の狭い空隙が残っている場所で罹網していた。Exp. 2 で罹網状態を観察したところ、カワハギの 85% が網の刺し機能によって罹網 (以下、刺し罹網) していたが、同時に背鰭の棘に網糸が絡んでいるものも多かった。ネズミゴチの 85% が網の絡み機能によって罹網 (以下、絡み罹網) し、前鰓蓋骨の棘への絡みによるものも多かった。カサゴでは、刺し・絡み罹網ともに発生していた。これらの魚種に比べて、マダイの罹網の 93% は網設置後 6 日以内に発生し、すべて刺し罹網していた。

実験開始から約 3 年後、その間の放置により網糸が劣化しているうえに破網して網が漁具の性状を維持していない部分 (Fig. 3-A) や、網が棒巻き状態になっている部分 (Fig. 3-B) でも、カワハギ、ネズミゴチ、カサゴなどの罹網は少数ながら発生した。

主要な罹網種以外のササノハベラ *Pseudolabrus japonicus*、メジナ *Girella punctata*、クロサギ *Gerres*

Table 1 Ghost-fishing mortality in number for species appeared during three experiments

Fish name	Scientific name	Exp. 1-1	Exp. 1-2	Exp. 2
Threadsail filefish	<i>Stephanolepis cirrifer</i>	14	2	99
Richardson's dragonet	<i>Repomucenus richardsonii</i>	29	0	36
Red sea dream snapper	<i>Pagrus major</i>	13	11	16
Black scraper	<i>Thamnaconus modestus</i>	8	3	20
Marbled rockfish	<i>Sebastes marmoratus</i>	7	0	24
Largescale blackfish	<i>Girella punctata</i>	5	1	11
Mackeral scad	<i>Decapterus</i> sp.	1	5	10
Bambooleaf wrasse	<i>Pseudolabrus japonicus</i>	0	0	9
Multicolorfin raimbowfish	<i>Halichoeres poecilopterus</i>	2	0	4
Temminck's surfperch	<i>Ditrema temminicki</i>	2	0	3
Lined silveryelly	<i>Gerres oyena</i>	1	2	1
Olive flounder	<i>Paralichthys olivaceus</i>	1	2	1
Blowfish	<i>Chelonodon patoca</i>	0	0	4
Isaki grunt	<i>Parapristipoma trilineatum</i>	3	0	0
Righteye flounder	Pleuronectidae	3	0	0
Striped catfish eel	<i>Plotosus lineatus</i>	0	0	3
Puffer	Tetraodontidae	2	0	0
Scarbreast tuskfish	<i>Choerodon azurio</i>	1	0	1
Painted sweetlips	<i>Plectorhynchus pictum</i>	0	0	2
Striped beakpersch	<i>Oplegnathus fasciatus</i>	0	0	2
Unicorn filefish	<i>Aluterus monoceros</i>	0	0	2
Snakefish	<i>Trachinocephalus myops</i>	1	0	0
Yellow emperor	<i>Diploprion bifasciatus</i>	1	0	0
Blue drum	<i>Nibea mitsukurii</i>	1	0	0
Dusky spinefoot	<i>Siganus fuscescens</i>	1	0	0
Japanese amberjack	<i>Seriola quinqueradiata</i>	0	1	0
Whitefin crevalle	<i>Kaiwarinus equula</i>	0	1	0
Whitespot-tail morwong	<i>Goniistius zonatus</i>	0	0	1
Humpbacked scorpionfish	<i>Scorpaenopsis diabolus</i>	0	0	1
Cinnamon flounder	<i>Pseudorhombus cinnamomeus</i>	0	0	1
Shirosabahugu puffer	<i>Lagocephalus wheeleri</i>	0	0	1
Total		96	28	252

A total the number of 68-times observations of Exp. 1-1 was conducted in 1,689 days, two-times observations of Exp. 1-2, in 3 days and 39-times observations of Exp. 2, in 176 days.

oyena, キハッソク *Diploprion bifasciatus*, キュウセン *Halichoeres poecilopterus* などが、展張された網と平行に遊泳したり、網地の破れた部位を通過するといった漁具近傍での行動が数多く観察されたが、罹網数は少なかった。これらのほかに、スズメダイ *Chromis notatus notatus*, メバル *Sebastes inermis*, ウミタナゴ *Ditrema temminicki*, オキエソ *Trachinocephalus myops*, アイゴ *Siganus fuscescens* などが供試網周辺で数多く観察されたが、罹網はごく少数かまらなかった。これらの結果から、少なくとも調査漁場では、カワハギ、ネズミゴチ、マダイ、カサゴなどに刺網のゴーストフィッシングが発生しやすかったといえる。

網高さの減少 網設置から約2日後に供試網の網地への付着物が目立つようになったが、水中網高さの減少

は見られなかった。約1週間後に、海底が岩場の場合には岩表面の小突起等への網目の纏絡が (Fig. 4-A), 砂場の場合には海底付近で海藻やゴミを巻き込んで着底した部分の網地の上への砂の堆積 (Fig. 4-B) が起こり、網高さが減少し始めた。罹網生物の骨や棘への網糸の巻き付き (Fig. 4-C) によって、一部分の網高さが減少している場合もあった。供試網1-1, 供試網2ともに約1ヶ月で、網全体としては約半分以下の高さになった。2年が経過した頃には浮子側が着底し、網地が完全に岩を覆って絡まるか (Fig. 4-D), 砂に埋没した。

漁具周辺の魚種構成と魚群密度 3つの実験の当初2回のサンプリングで得られた1日あたりの罹網数を、二元配置分散分析法を用いて経過日数に対応させて比較した結果 ($P=0.18>0.05$), すべての実験の間で有意

Fig. 2 Fishes around simulated lost-gillnets; (A) *S. cirrhifer* nibbling another *S. cirrhifer* entangled and dead 44 days after deployment of net, (B) *S. cirrhifer* nibbling on gillnet with fouling organisms 175 days after deployment of net

Fig. 3 Ghost fishing by simulated lost-gillnet after long period of immersion: Entangled fishes were; (A) *S. marmoratus* 1,567 days after deployment of net, (B) unidentified fish being decomposed 1,198 days later.

Fig. 4 Simulated lost-gillnets and fishes around nets; (A) part of gillnet entangled on rock (57 days), (B) bottom part of gillnet being rolled up on sandy bottom (16 days), (C) part of gillnet stuck by spines of entangled fish, (54 days), and (D) entanglement of gillnet over rocks (777 days)

Table 2 Ghost-fishing mortality in number of each experiment during the first two days since deployment of net

Days since deployment	Exp. 1-1	Exp. 1-2	Exp. 2
1	23	21	26
2	4	7	12
<i>P. major</i>	7	11	12
<i>S. cirrhifer</i>	2	2	8
<i>R. richardsonii</i>	6	0	5
<i>Decapterus</i> sp.	0	5	6
<i>T. modestus</i>	0	3	2
<i>P. trilineatum</i>	3	0	0
<i>G. punctata</i>	2	1	0
<i>S. marmoratus</i>	2	0	1
<i>G. oyena</i>	1	2	0
<i>D. temminicki</i>	1	0	1
<i>P. olivaceus</i>	0	2	0
<i>P. japonicus</i>	0	0	2
<i>T. myops</i>	1	0	0
<i>S. fuscescens</i>	1	0	0
Tetraodontidae	1	0	0
<i>S. quinqueriadiata</i>	0	1	0
<i>K. equula</i>	0	1	0
<i>C. patoca</i>	0	0	1

差はなかった (Table 2)。実験ごとに2回のサンプリングを合計した、魚種ごとの罹網数を Friedman の検定法を用いて比較した結果でも ($P=0.86>0.05$)、すべての実験の間に有意差はなかった (Table 2)。この2回でもっとも多く罹網した魚種は全実験ともにマダイで、各実験での上位種はほぼ同じであった。これらの事実は、各実験期間中の供試漁具周辺の魚群密度と魚種構成に差がなく、全実験はほぼ同じ漁場条件で行われたことを示していると判断した。特に、Exp. 1-1 と Exp. 1-2 の間で差がなかったことは、以下で示す供試網による罹網数の減少傾向が、漁具周辺の魚群密度の低下ではなく、供試網のゴーストフィッシング能力の低下によることを示している。

Exp. 1-1 と Exp. 2 の両者で、実験開始から15日目までの各日と35日目、42日目、56日目の計18回、経過日数を同じくするサンプリングが行われ、それぞれ18種87尾、21種151尾の罹網を観察した (Table 3)。両者の罹網数上位6種のうち5種は、順位は異なるが同じ魚種であった。魚種ごとの合計罹網数を Wilcoxon の符号順位検定法を用いて比較した結果、両者に有意差はなかった ($P=0.10>0.05$)。これらのことから、両実験での罹網魚の種構成に差はなかったと判断し、次節以降で両実験結果を合して分析できると判断した。

全魚種に対するゴーストフィッシング能力の変化 1日あたりの罹網数は実験開始後2日間は急速に、その

Table 3 Ghost-fishing mortality in number of Exp. 1-1 and Exp. 2 during the same days since deployment of net for species

Species	Exp. 1-1	Exp. 2
<i>S. cirrhifer</i>	11	43
<i>R. richardsonii</i>	28	24
<i>P. major</i>	13	15
<i>T. modestus</i>	6	15
<i>S. marmoratus</i>	6	13
<i>Decapterus</i> sp.	1	10
<i>P. japonicus</i>	0	8
<i>G. punctata</i>	5	1
<i>H. poecilopterus</i>	2	4
Others (18 spp.)	15	18

Date were sum of ghost-fishing mortality in number during first 15 days, and on 35-, 42- and 56-day since deployment of net.

後は緩やかに減少した。全実験で得られた全魚種の1日あたりの罹網数から、ゴーストフィッシング能力 N_t の変化は(1)式のように近似できた。

$$N_t = 16.6(1 - 0.930)^t + 6.74(1 - 0.0123)^t \quad (1)$$

実験式の第1項はゴーストフィッシング能力が網設置直後に急速に低下する成分を、第2項は長期間にわたって緩やかに低下する成分を代表している。全魚種に対するゴーストフィッシング能力の低下と観察した1日あたりの罹網数を Fig. 5 に示した。

本研究と既往研究のモデルを比較するために、Kaiser *et al.*,²⁵⁾ Erzini *et al.*²⁶⁾ が用いた1項のみで近似するモデルを本研究の1日あたりの罹網数に適用したところ、それぞれ(2)式、(3)式を得た。

$$\ln(N_t + 1) = 2.67 - 0.360 \ln(t + 1) \quad (2)$$

$$N_t = 10.0 \exp(-0.0292t) \quad (3)$$

(1)~(3)式のAICは、それぞれ184, 268, 232で、本研究で採用した(1)式の値が一番小さかった。(2)式、(3)式による初期値は、観察0日目の罹網数の平均値(23尾)よりそれぞれ42%, 57%小さく、1日目の値は両者ともに観察1日目の罹網数の平均値(7.7尾)より、約30%大きかった。このように既往のモデルでは、本研究での初期罹網数の急速な変化を表現できなかった。低下要因がおもに二つであると考えたことや上記の結果から、2項の式による近似が適切であると判断した。

2 魚種群に対するゴーストフィッシング能力の変化 1日あたりの罹網数が、罹網した魚種のうちマダイ、ムロアジ属の1種 *Decapterus* sp. では当初2日間で急速に減少し、カワハギ科の数種、ネズミゴチなどは経過日数に伴って緩やかに減少しつつ長期間継続したことから、魚種を罹網の継続し易さで2群に分けた。まず、(1)式の第1項でのゴーストフィッシング能力が、この項の初期値 A_1 に対して十分小さい5%になる日を求めたと

Fig. 5 Decreasing ghost-fishing ability since loss of net: The upper graph shows the ghost-fishing ability over the entire experimental period, and the lower graph enlarges the daily mortality during the first week of each experiment.

ころ、経過日数1日目と2日目の間であったので、経過日数1日目までを初期、2日目以降を長期と定義した。観察された羅網魚376尾のうち93尾(25%)のゴーストフィッシングは初期に、283尾(75%)は長期に発生していた。全実験での種ごとの合計羅網数が10尾以上の魚種7種を対象とし、種別羅網数のうち初期で発生する率を求めた。上記の25%を羅網の初期発生母比率として、各魚種の初期発生率を母比率と比較した結果(母比率の検定 $P=0.05$)、マダイ、ムロアジ属の1種でこれが有意に大きかった。一方、カワハギで有意に小さかった(長期での発生率が有意に75%以上)。この結果、前2種を初期羅網魚種群、後1種を長期羅網魚種群と分類した(Table 4)。ネズミゴチ、ウマヅラハギ *Thamnaconus modestus*、カサゴ、メジナの羅網初期発生率は母比率より小さかったが差は有意ではなく、上記いずれの魚種群にも分類できなかった。

全実験から得られた各魚種群の1日あたりの羅網数から、初期羅網魚種群(N_{st})と長期羅網魚種群(N_{lt})に対するゴーストフィッシング能力の変化は以下のように近似できた。

$$N_{st} = 10.0(1 - 0.942)^t + 1.63(1 - 0.159)^t \quad (4)$$

Table 4 Specific ratios of ghost-fishing mortality in the first two days to those all through experiment and their comparison with population ratio, 0.25

Species	Ghost-fishing mortality		sum	%	Statistic Z_0
	$t=0,1$	$t>2$			
<i>P. major</i>	30	10	40	75	7.37*
<i>Decapterus</i> sp.	11	5	16	69	4.08*
<i>G. punctata</i>	3	14	17	18	0.68
<i>R. richardsonii</i>	11	54	65	17	1.46
<i>T. modestus</i>	5	26	31	16	1.11
<i>S. marmoratus</i>	3	28	31	10	1.94
<i>S. cirrhifer</i>	12	103	115	10	3.55**
All species	93	283	376	25	

The ratio of total number of ghost-fishing mortality in the first two days to that all through experiment for all species, 0.25 was assumed to be the population ratio of mortality in the short period of time (first two days since loss of net). * shows species ghost-fished mainly in a short period of time with the ratio significantly larger than 0.25. ** shows species ghost-fished mainly in a long period time (days from 2 to 1688 since loss of net) with the ratio significantly smaller than 0.25.

$$N_{lt} = 1.93(1 - 0.00289)^t \quad (5)$$

長期羅網魚種群の場合、要因別初期値の一方が0となる場合が最適となり、その長期間にわたって緩やかに減少する傾向を反映していた。各魚種群に対するゴーストフィッシング能力の低下と観察した1日あたりの羅網数をFig. 6に示した。

刺網のゴーストフィッシングの継続期間と死亡数の推定 (1), (4), (5)式をもとに、経過日数 t 日目のゴーストフィッシング能力の、それぞれの初期能力に対する低下率を求めた(Fig. 7)。全魚種の場合は経過日数1日目で当初の33%, 1週間で27%, 1ヶ月で20%, 半年で3.0%にまで低下すると推定した。初期羅網魚種群、長期羅網魚種群の場合は1週間でそれぞれ4.1%, 98%に低下し、初期羅網魚種群に対するゴーストフィッシングはごく短期間しか継続しないことを示唆している。長期羅網魚種群に対するゴーストフィッシング能力は1年後でも35%に低下するのみで、5%まで低下するのに1,035日を要すると推定した。

ゴーストフィッシング能力の継続期間を、全魚種に対するゴーストフィッシング能力がその初期能力に対して十分小さい5%に低下するまでの期間とおくと、(1)式から141日であると推定できた。本論では、総羅網数は総ゴーストフィッシング死亡数に等しいと見なしているので、全魚種、初期羅網魚種群、長期羅網魚種群それぞれの総死亡数は、(1), (4), (5)式の上記141日目までの積分によって、それぞれ455尾, 13尾, 223尾と推定できた。この期間中の日平均死亡数はそれぞれ3.2尾/日, 0.091尾/日, 1.6尾/日であった。

Fig. 6 Decreasing ghost-fishing ability after the loss of the net for fish groups with different characteristics in terms of continuation of ghost fishing illustrated for the first 80 days: The upper graph shows ghost-fishing ability for the species ghost-fished for a short period of time, and the lower graph, that for a long period of time.

Fig. 7 Ratio of ghost-fishing ability of lost gillnet since the loss of the net to each value at the beginning for all species and for groups of species with different characteristics of continuation of ghost fishing.

考 察

逸失刺網による罹網数は、一般の漁獲尾数と同様に、漁具のゴーストフィッシング能力と漁具周辺の資源密度

の積に比例する。したがって、観察した魚種の罹網数が供試漁具のゴーストフィッシング能力を代表すると見なすには、実験期間中の漁具周辺の魚群構成が一定であると仮定することが必要である。Carr *et al.*²³⁾は、記録に現れた、実験開始から長期間が経過した後の魚種の罹網数の増加を、魚の回遊による魚群密度の増加によるものかもしれないと記したが、その原因は特定できなかった。本研究では、漁具を水中で展張することで供試網の設置場所を正確に同じにしつつ、漁獲能力が等しいと見なせる状態の漁具による漁獲物構成を比較することによって、供試網によるゴーストフィッシングが実験中の網周辺の魚群構成に影響しなかったことを確認した。特に Exp. 1-2 を行うことで、得られた罹網数の経時的な減少は漁具のゴーストフィッシング能力の低下のみによると見なせることを示した。

本研究と同様に連続した2日間の潜水観察から逸失刺網によるゴーストフィッシング能力を推定したこれまでの2例の研究では、魚種に対して $\ln N = 3.08 - 0.605 \ln t$ ²⁵⁾ 魚類と甲殻類の合計 (魚類が79%) に対して $N = 18.16 \exp(-0.0542 t)$ ²⁶⁾ と、いずれも1項のモデルで近似した。ゴーストフィッシング能力の低下の要因は視認性の増大と有効漁獲面積の減少のおもに二つであり、²³⁻²⁶⁾ それらの発現期間の長さが異なることを示唆する観察結果が得られたので、本研究では2項の和を用いて近似したが、それが適切であることは3つのモデルを本実験データに適用した場合のAICが示している。念のために、実験での観察日と同じ t 日目での罹網数 N_{ct} の模擬データ系列を(6)式で生成し、本研究と同じ方法で近似式を求めるシミュレーションを行った。ここで、 n_t と N_t は観察と(3)式による t 日目での罹網数で、 m は N_t の平均値、 s は N_t と n_t の残差の標準偏差、 x ($0 \leq x \leq 1$) は乱数、 $P^{-1}(x)$ は標準正規確率分布関数の逆関数である。

$$N_{ct} = N_t + P^{-1}(x) \cdot s \cdot (N_t/m) \quad (6)$$

5回のシミュレーション結果では、 A_1 と A_2 の和はすべて19.3から27.5の間で、実験での0日目の観察罹網数の平均値 (23尾) に近い値となるとともに、 r_1 と r_2 の間には常に1.8から2.0桁の差があり、2つの要因が常に分離される傾向が示され、本研究のモデルの有効性が確認できた。

例外的に、長期罹網魚種群は1項のみによる近似式となった。観察した1日あたりの罹網数 (Fig. 6 下図)、(5)式の低下率 r と(1)式、(4)式それらとの比較、および上記のシミュレーション結果から、長期罹網魚種群の場合は、初期に急速に低下する成分を欠いているもので、初期のみに発現する要因の影響をほとんど受けないためであると考えた。

これまでの1年以内という比較的短期間での刺網の

ゴーストフィッシング研究とは異なり, 本研究での長期観察から, ゴーストフィッシングが逸失後短期間のみに起こりやすい魚種と長期間継続しやすい魚種があることがわかった。この差は, 遊泳層と網地に対する行動や棘などの体構造上の種間差に起因すると考える。初期罹網魚種群のマダイ, ムロアジの1種は比較的遊泳力があり海底から離れて遊泳する魚種である。一方, 長期罹網魚種群のカワハギでは結果に記したように網地近傍での行動が多く観察され (Fig. 2), その結果, 棘を網に絡ませる, 網目に刺さるなどして長期間にわたるゴーストフィッシングが起こると考えた。継続期間による分類ができなかったネズミゴチ, カサゴでも罹網が長期間にわたって発生したが, これらの種は海底のごく近傍を遊泳すること, 体表の棘が網に絡まりやすいことからゴーストフィッシングが継続しやすいものと考えた。

ゴーストフィッシング能力低下の要因との関連で, 浮子高さをパラメータとした罹網数の近似²⁵⁾や有効漁獲面積の推定を行った研究²⁶⁾がある。ただし, 潮流流による影響を受ける海域では, 浮子高さのスポット的な計測では, 漁具の有効面積の推定に利用できるほど正確には網高さは捉えきれない。本研究では, 流れの影響を含まない網高さの計測を行うために, 展開している目数の計測を試みた。しかし, 網地の底辺部以外での罹網魚の骨や棘へのものつれや (Fig. 4-C), 岩表面を覆うように纏絡している部分 (Fig. 4-A), 棒巻き状態の部分 (Fig. 3-B) が網長さ方向にわたって不規則に発生したことから, 見るべき結果は得られなかった。本研究も逸失刺網の有効面積の減少がゴーストフィッシング能力低下の要因の一つであるとの仮説を支持してはいるが, 有効網高さのみをパラメータとしたゴーストフィッシング死亡数の定量的な評価はきわめて困難であると考えた。

本研究ではきわめて長期間にわたる観察を行ったが, 逸失刺網がゴーストフィッシング能力を完全に喪失する時点を決定するのはやはり困難であった。そこで, ゴーストフィッシング能力が, 初期能力の5%に低下するまでをゴーストフィッシング継続期間とみなした。Kaiser *et al.*²⁵⁾は供試刺網による魚類の総罹網数を70日間で226尾, Erzini *et al.*²⁶⁾は甲殻類等を含めた動物の総罹網数を120日間で344個体と推定したが, どちらも継続期間は定義しておらず, 総罹網数の推定に上記の日数を用いた根拠も示さなかった。ゴーストフィッシング継続期間を本研究と同様に定義し, 両者の近似式から継続期間と総死亡数を推定すると, 前者では継続期間141日間で総死亡数334尾, 後者では56日間で318尾であった。これらに比べて, 既往研究での日数, 総死亡数推定値はともに過大, 過少にばらついており, 継続期間についての基準が必要であることを示唆している。一方, 上記の両推定値は, 継続期間142日, 総死亡数455

尾とした本研究の結果とはほぼ同程度であり, 漁場が異なることと, 漁具の仕立て上がりサイズなどが異なること (前者で90 m×3 m, 後者で100 m×推定2.1 m, 本研究で72 m×2.3 m), 甲殻類を含めるか否かなどが異なることから一概にはいえないが, これらの結果は底刺し網によるゴーストフィッシング死亡数の実用的推定に利用できる概数を示唆していると言える。

今後の刺網によるゴーストフィッシングの研究では, 魚種によりゴーストフィッシング継続期間が異なることから主要なゴーストフィッシング魚種が見かけ上漁具逸失後の時間経過とともに交代すること, 長期罹網魚種ではゴーストフィッシングの影響は3年近くに及ぶ可能性が高いことを十分に考慮するとともに, ゴーストフィッシング継続期間を明確に定義して行うことが必要である。ゴーストフィッシングの実態は, 漁具の仕様, 海底条件, 逸失後の状態などによりさまざまに異なる可能性があるため, 今後の事例研究の蓄積が必要である。

謝 辞

本研究の分析にあたり助言を頂いた鹿児島大学水産学部安楽和彦助教授, Miguel Federico Vazquez Archdale 講師, 本研究の潜水調査にあたりご協力を頂いた鹿児島大学水産学部学生, 川添美紀, 青木優尚, 故井上琢也, 佐々木壮, 西谷紀彦, 池田真丈, 広瀬純の各氏に心から感謝致します。

文 献

- 1) Smolowitz RJ. Trap design and ghost fishing: an overview. *Mar. Fish. Rev.* 1978; **40**: 2-8.
- 2) 松岡達郎. 東町水域における逸失かごとゴーストフィッシング. *Mini Rev. Date File Fish. Res.* 1999; **8**: 64-69.
- 3) Degange AR, Newby TC. Mortality of seabirds and fish in a lost salmon driftnet. *Mar. Pollut. Bull.* 1980; **11**: 322-323.
- 4) Stewart BS, Yochem PK. Entanglement of pinnipeds in synthetic debris and fishing net and line fragments at San Nicolas and San Miguel Island, California, 1978-1986. *Mar. Pollut. Bull.* 1987; **18**: 336-339.
- 5) Donohue MJ, Boland RC, Sramek CM, Antonelis GA. Derelict fishing gear in the Northwestern Hawaiian Islands: diving surveys and debris removal in 1999 confirm threat to coral reef ecosystems. *Mar. Pollut. Bull.* 2001; **42**: 1301-1312.
- 6) Sutherland DL, Beardsley GL, Jones RS. Results of a survey of the south-Florida fish-trap fishing grounds using a manned submersible. *Northeast Gulf Sci.* 1983; **6**: 179-183.
- 7) Galgani F, Souplet A, Cadiou Y. Accumulation of debris on the deep floor off the French Mediterranean coast. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996; **142**: 225-234.
- 8) Slip DJ, Burton HR IV. Accumulation of fishing debris, plastic litter, and other artifacts, on Heard and Macquarie Islands in the southern ocean. *Environ. Conser.* 1991; **18**: 249-254.

- 9) 松岡達郎. 混獲投棄とその防止に関する研究. 日本誌 1999; **64**: 630-633.
- 10) 松下吉樹. 曳網漁業における混獲防御技術. 日本誌 2000; **66**: 261-268.
- 11) 改良型混獲投棄 (SURF-BRD) 付き小型底曳網の模型実験. 日本誌 2001; **67**: 710-716.
- 12) 平井良夫, 西ノ首英之. 有明海小型底曳網漁業に置ける混獲物の投棄の実態. 日本誌 2003; **69**: 330-336.
- 13) Anon. *Code of conduct for responsible fisheries*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italy. 1995.
- 14) High WL. Escape of Dungeness crabs from pots. *Mar. Fish. Rev.* 1976; **38**: 19-23.
- 15) Pecci KJ, Cooper RA, Newell CD, Clifford RA, Smolowitz RJ. Ghost fishing of vented and unvented lobster, *Homarus americanus*, traps. *Mar. Fish. Rev.* 1978; **40**: 9-43.
- 16) Breen PA. Mortality of Dungeness crabs caused by lost traps in the Fraser River estuary, British Columbia. *N. Am. J. Fish. Manage.* 1987; **7**: 429-435.
- 17) Guillory V. Ghost fishing by Blue crab traps. *N. Am. J. Fish. Manage.* 1993; **13**: 459-466.
- 18) Matsuoka T, Osako T, Miyagi M. Underwater observation and assessment on ghost fishing by lost fish-traps. In: Zhou Y, Zhou H, Yao C, Lu Y, Hu F, Chui H, Din F (eds) *Proceedings of the Forth Asian Fisheries Forum Beijing 16-20 October 1995*. Asian Fisheries Society, Beijing, China. 1995; 179-183.
- 19) Bullimore BA, Newman PB, Kaiser MJ, Gilbert SE, Lock KM. A study of catches in a fleet of "ghost-fishing" pots. *Fish. Bull.* 2001; **99**: 247-253.
- 20) High WL, Worlund DD. Escape of king crab, *Paralithodes camtschatica*, from derelict pots. NOAA Technical Report NMFS SSRF-734, 1979; 1-11.
- 21) Kimker A. Tanner crab survival in closed pots. *Alaska Fish. Res. Bull.* 1994; **1**: 179-183.
- 22) Hebert M, Miron G, Moriyasu M, Vienneau R, DeGace P. Efficiency and ghost fishing of snow crab, (*Chinocetes opilio*) traps in the Gulf of St. Lawrence. *Fish. Res.* 2001; **52**: 143-153.
- 23) Carr HA, Amaral EH, Hulbert AW, Cooper R. Underwater survey of simulated lost demersal and lost commercial gill nets off New England. In: Shomura RS, Yoshida HO. (eds) *Proceedings of the Workshop on the Fate and Impact of Marine Debris 26-29 November 1984 Honolulu Hawaii*. U. S. Commer, Hawaii Honolulu. 1985; 438-447.
- 24) Carr HA, Blott AJ, Caruso PG. A study of ghost gillnets in the inshore waters of southern New England. *Proceeding of Marine Technology Society '92 Conference*. Marine Technology Society, Washington D. C. 1992; 361-366.
- 25) Kaiser MJ, Bullimore B, Newman P, Lock K, Gilbert S. Catches in 'ghost fishing' set nets. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996; **145**: 11-16.
- 26) Erzini K, Monteiro CC, Ribeiro J, Santos MN, Gasper M, Monteiro P. An experimental study of gill net and trammel net 'ghost fishing' off the Algarve (southern Portugal). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1997; **158**: 257-265.
- 27) Anon. Ghost-fishing. In: Paul J, Hart B, Reynolds JD (eds) *Handbook of Fish and Fisheries volume 2*, United Kingdom. 2002; 360-361.
- 28) 東海 正. MS-Excel のソルバーによる曳網の網目選択性 Logistic 式パラメータの最尤推定. 水産海洋研究 1997; **61**: 288-298.
- 29) 藤森康澄, 東海 正. 石田の方法と北原の方法による MS-Excel を用いた刺網の網目選択性曲線の推定. 水産海洋研究 1999; **63**: 14-25.