

北太平洋アカイカ釣り漁業における釣獲技術向上に関する研究*¹

Study on improving jigging capture techniques for neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, in the North Pacific Ocean

黒坂浩平*²

Kohei KUROSAKA

Abstract: The aim of this study is to improve jigging capture techniques for the neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, and identify the mechanism of, and countermeasures thereto, of frequently-observed catch loss due to hooked squid falling off.

In Chapter I, the history of neon flying squid fishing is summarized, problems of current squid fishing are mentioned, and a direction toward a technological solution is indicated. This chapter reports that drift net fishing of neon flying squid started in the 1970s, but that in 1992, a United Nations moratorium on the use of drift nets in the open seas resulted in a change in 1993 in neon flying squid fishing from drift net use to jigging (line catching). Today, most of the fishing boats operating in the area are Japanese, Taiwanese or Chinese. Chapter II describes the finding, obtained by DNA analysis, that the neon flying squid inhabiting the fishing grounds in the North Pacific Ocean belong to a single genetic group and are a resource requiring international fishery management to prevent overfishing by a growing number of fishing boats. For appropriate fisheries management of the neon flying squid in this fishing ground, the actual conditions of the jigging capture process need to be understood. The results of surveys in 2003 to 2008 are summarized in the subsequent five chapters. Chapter III investigates the mechanism of tentacle breakage during jigging as a possible cause of the fall-off event. Chapter IV describes the relationship between boat motion and falling-off of squid, and in Chapter V, transmission of boat motion to fishing lines is elucidated, providing a pointer to understanding the event of hooked squid falling off. To reduce squid fall-off from the jig, the effects of increased hauling speed of fishing line on squid hooking are analyzed in Chapter VI. Chapter VII describes a thorough examination of the hauling speed of jigging machines, aiming to reduce the fall-off ratio and increase the catch. In Chapter VIII, improvements of techniques for fishing neon flying squid and fishery management methods are discussed after integrating the results.

From an observation of upward reeling of jigs, the fall-off event of squid was classified into the following three patterns. Cases where only tentacles remained on the jigs are named “underwater fall-offs.” Fall-offs after the squid have come out of the water but before touching the guide roller are “above-water fall-offs,” and those that fall off while in contact with the guide roller are called “fall-offs upon contact.” According to a survey of fallen-off squid conducted over three years from 2006 to 2008, the total fall-off ratio accounted for 36% of all squid hooked. The ratio of underwater fall-offs was notably high. The fall-off ratio of squid that had hooked by only one or more tentacles accounted for 92% of all fallen-off squid. When the relationship between mantle length and fall-

2017年11月21日受理 (Received on November 21, 2017)

*¹ 東京海洋大学審査学位論文 (掲載に際し投稿規定に沿って一部修正した。)

*² 開発調査センター 〒220-6115 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-3 タイーンズタワーB棟15階

(Marine Fisheries Research and Development Center, 2-3-3, minatomirai, nishiku, yokohama, kanagawa 220-6115, Japan)

off ratio was analyzed using a logistic curve, the fall-off ratio was found to be high in small squid: the mantle length (ML) at which 50% (F_{50}) fell off from the jig was estimated to be 37.4 cm. Observation of hooked conditions of caught and fallen-off squid and their body size showed that caught squid that had hooked by three or more arms were significantly larger than those that were hooked only by one or more tentacles. The high fall-off ratio of squid smaller than F_{50} was therefore likely attributable to the squid capturing the jig with one or more tentacles, followed by breakage of the tentacles. Squid larger than F_{50} have greater propulsive power, and are thus more likely than smaller squid to embrace the jig with their arms rather than their tentacles, resulting in a lower fall-off ratio. Measurement of the breaking strength of a tentacle of a squid smaller than $ML_{41.4}$ cm showed that the tentacle broke under a force close to its body weight. This suggests that small squid are prone to tentacle breakage if they capture the jig using only one tentacle.

Past surveys have reported high fall-off ratio from jigging machines installed at either the bow or stern during stormy weather. In this study, the author investigated the reproducibility of the relationship between fall-off ratio and boat motion, and conducted a logistic regression analysis to investigate the effects of boat motion on squid fall-offs. A survey was conducted on a squid jigging vessel, the Hakurei Maru No.8 (276 GT, automatic squid jigging machines: 21 on the port side and 22 on the starboard side), in 2003 to 2005. The numbers of squid captured and those that fell off per jigging machine were counted once daily over 2 hours around sunset or after dark. When the sea was calm, with a wind at Force 4 or below, fewer squid fell from jigging machines that were nearer to the bow or stern and which had a longer cradle attached. In other words, a pattern of significantly lower fall-offs was observed for fishing lines that were relatively strongly influenced by pitching and rolling when the sea was calm. This was likely attributable to the capturing behaviors of this species. The motions of the jig caused by boat motion appeared to have triggered the squid to grasp the jig with both its arms plus its tentacles. On the other hand, with a wind at Force 5 or more in stormy weather, the fall-off ratio was significantly higher in machines at the stern and bow. To analyze this event, the author investigated whether or not the boat's motions were transmitted to the jig by measuring the motions of both the vessel and jigs using an M380L-D2GT acceleration data logger (Little Leonard Co. Ltd., Tokyo, Japan, hereinafter 'acceleration logger'). The power spectral density (PSD) was calculated using fast Fourier transform (FFT) to investigate the properties of acceleration signals recorded at the guide roller and fishing line. The calculation revealed that the spectrum detected at underwater jigs had the same period as the dominant period (0.125–0.090 Hz) of the boat motion detected at the guide roller, showing that boat motion was in fact transmitted to underwater jigs. During stormy weather, large motions of the boat are transmitted to the jigs, and this appears to cause tentacle breakage before the squid is able to embrace the jig with its arms.

To reduce fall-offs of squid from a jig, we need to understand the relationship between the motions of a jig while it is being hauled upwards and the hooking state of neon flying squid. The jigs' motions were measured by installing an acceleration logger on a fishing line used for squid jigging, where the wire and nylon gut joined. While detecting sudden increases in load exceeding 6 kgf at the jigging machine, which were displayed on the integrated control and display, the time and depth of capture were recorded. The behaviors of a neon flying squid while it captured a jig were then assessed from the data and the accelerogram of the acceleration logger. The upward speed of the fishing line one second before a neon flying squid captured a jig was calculated using the difference in depth between two adjacent depth data, which were also recorded during the survey. The catch or fall-off of the said squid was also recorded. We noted that a squid embraced a jig with its arms when the upward speed of the fishing line was around 1.5 m/s but captured the jig with only its tentacles when the speed was about 2.5 m/s. This observation suggests that there

is a threshold value of upward speed of a fishing line that determines whether a neon flying squid catches a jig with its tentacles or embraces it with its arms.

To measure relative fall-offs of neon flying squid during jigging, the drum hauling speed was altered. Six different drum hauling speeds, ranging from 50 to 80 revolutions per minute, were tested and their relationship with the fall-off ratio was investigated. A drum hauling speed of 50 rpm was found to result in a low fall-off ratio. To estimate the upward speed of the fishing line at which a neon flying squid is most likely to capture a jig with its tentacles, the relationship between the tentacle-hooked ratio (the ratio of tentacle hooking as a proportion of all hooking) and upward jig speed was investigated. The upward jig speed at which a half of all squid capturing a jig caught the jig only with one or more tentacles was designated the 50% tentacle-hooked ratio (R_{50}) and was inferred to be 1.75 m/s. It was deduced that the tentacle-hooked ratio increases at upward jig speeds that exceed R_{50} , resulting in a high tentacle-hooking ratio and fall-off due to tentacle breakage. In respect to the relationship between drum hauling speed and R_{50} , 60 rpm or slower resulted in an upward jig speed within the 0.92–1.65 m/s range, or slower than R_{50} . On the other hand, when the drum hauling speed was 65 rpm or faster, the upward jig speed rose to 1.79–2.20 m/s, and speeds greater than R_{50} were detected. A demonstration experiment was conducted based on these results. When squid were fished by sinking the tip of the line to a depth of 150 m, the number of squid caught per hour per line (CPUE) was the greatest at 70 to 75 rpm. This was because the fast drum hauling speed increased the number of squid caught per stroke or cycle of drawing and pulling the line. Lowering of the drum hauling speed to 50 rpm did not increase the CPUE in this experiment, likely because large squid of F_{50} or larger accounted for 64% of all squid. The catch can therefore be increased by increasing the drum hauling speed to 70 to 75 rpm if the squid are ML_{35} cm or larger and reducing the drum hauling speed to reduce the fall-off ratio if the squid are smaller than ML_{35} cm.

This study revealed that the mechanism of neon flying squid falling off from a jig is due to the squid capturing a jig with one or more tentacles followed by breakage of the tentacle during hauling. The author proposes a possible means of reducing fall-off by controlling the drum hauling speed and the rational use of resources by searching fishing grounds for larger squid.

Key words: neon flying squid, fall-off, logistic curve, tentacle breakage, squid jigging

目次	3.1. 緒言
	3.2. 材料と方法
第I章 アカイカ釣り漁業の変遷	3.2.1 釣獲と脱落状況の観察
1.1 流し網漁業	3.2.2 体サイズと脱落率
1.2 イカ釣り漁業	3.2.3 触腕破断強度の測定
1.3 輸入動向	3.3 結果
1.4 外国漁船との競合	3.3.1 釣獲と脱落状況の観察
1.5 本研究の概要	3.3.2 体サイズと脱落率
第II章 ミトコンドリアDNA分析の塩基配列から推測したアカイカの集団構造	3.3.3 触腕破断強度の測定
2.1 緒言	3.4 考察
2.2 材料と方法	第IV章 アカイカ釣りにおける釣り落としと船体運動との関係
2.3 結果	4.1 緒言
2.4 考察	4.2 材料と方法
第III章 釣獲過程におけるアカイカの触腕破断機構	4.2.1 船体位置による釣獲・脱落状況の観測

4.2.2	脱落率と船体運動
4.3	結 果
4.3.1	船体位置による釣獲・脱落状況の観察
4.3.2	脱落率と船体運動
4.4	考 察
第V章	アカイカ釣り操業における釣具ラインの運動と船体運動検出の試み
5.1	緒 言
5.2	材料と方法
5.3	結 果
5.4	考 察
第VI章	自動イカ釣機の釣具ライン上昇速度がアカイカの擬餌針捕捉行動に及ぼす影響
6.1	緒 言
6.2	材料と方法
6.2.1	加速度ロガーによる釣具ライン上昇速度の計測
6.2.2	針掛かりしたアカイカの観察
6.3	結 果
6.4	考 察
第VII章	アカイカ釣り漁業における釣具巻上げ回転数制御による脱落率低減
7.1	緒 言
7.2	材料と方法
7.2.1	巻上げ回転数の最適化試験
7.2.2	釣具ライン上昇速度と擬餌針の捕捉行動に関する計測
7.2.3	触腕による擬餌針捕捉率に関する解析
7.2.4	釣具ラインの上昇速度と巻上げ回転数との関係
7.3	結 果
7.3.1	巻上げ回転数の最適化試験
7.3.2	触腕による擬餌針捕捉率に関する解析
7.3.3	釣具ラインの上昇速度と巻上げ回転数との関係
7.4	考 察
第VIII章	総合考察
謝 辞	
文 献	

第I章 アカイカ釣り漁業の変遷

1.1 流し網漁業

アカイカ (*Ommastrephes bartramii*) を対象とした釣り漁業は1970年代中頃からのスルメイカの不漁を補うため三陸や道東沖で始まり、1977年には年間12万

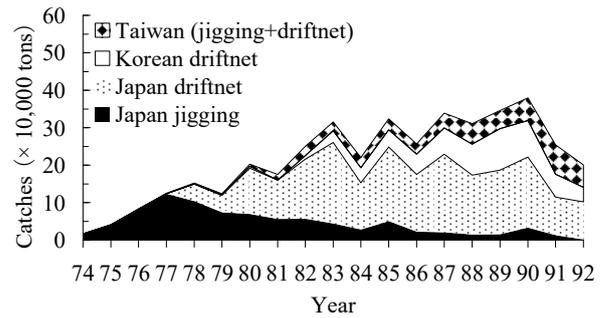


Fig. 1. Yearly catch trends of neon flying squid in the North Pacific during 1974–1992, by countries and fishing types (Annual Statistics of Fishery and Fish Culture and FAO fishstat plus).

トンが釣獲されていた (酒井, 2012)。他方, 同海域でさけます流し網に混獲されていたアカイカは産業の対象として重視されていなかった。しかし, 1970年代後半から冷凍設備を持ったイカ流し網漁船が出現し, 鮮度のよいアカイカを水揚げするようになったことから, 需要が高まり, ソフトサキイカなどの加工技術が開発され (中谷, 2003), アカイカ流し網漁船が増加し始めた (日本遠洋いか漁業協同組合, 2008)。これは1978年に公海におけるさけます流し網漁業が全面禁止となったため, 不要となった流し網を利用したのが始まりである。アカイカを対象とする北太平洋公海のイカ流し網漁業は, 夜間に浮上したアカイカを漁獲するものである。イカ流し網漁業は, イカ釣り漁業よりも効率的にイカを漁獲できることから急速に発展した (日本遠洋いか漁業協同組合, 2008)。他方, 釣りによるアカイカの年間漁獲量は, 1978年に12.4万トンと最高を記録した (Fig. 1)。このため, 既存の釣り漁業と漁場を巡る競合が発生した (田中, 1987)。これを回避するため, 日本政府により1978年から東経170°以西を釣り漁業, それ以东 (西経145°まで) を流し網漁業とする規制が実施された (上野・酒井, 2010)。以後, イカ釣りによる漁獲量は徐々に減少し, 1980年代後期には約2万トンとなった (Fig. 1)。

イカ流し網漁船数は1978年の800隻余りから1981年の534隻へ減少したが (谷津ら, 1994), 流し網によるアカイカの漁獲量は新漁場の開発と漁船の大型化 (谷津ら, 1994) により, さらに伸びをみせ, 1990年代初めまでに毎年6月から12月末までの7ヶ月間で15~20万トン (Fig. 1) となった。これに対応して, 日本政府は1981年にイカ流し網漁業を承認制とし (田中, 1987), 1982年には529隻のイカ流し網漁船を承認した。1980年代には韓国と台湾も参入し, 日本, 韓国, 台湾の3国による年間総漁獲量は24.8万~37.8万

トン(1985~90年平均32.8万トン)となった(Fig. 1)。

1.2 イカ釣り漁業

北太平洋の流し網漁業はその漁法の性格上、アカイカ以外の海産ほ乳類や海鳥等の混獲が避けられない(Northridge, 1991)。このような状況から、環境保護団体の強い影響を受けたアメリカ政府は、1991年公海流し網規正法を制定した。アメリカ政府は海産ほ乳類の保護を目的としたマグナソン法を1978年に制定しており、違反した国には経済制裁を課すことができる。このため、アメリカ政府はこれまでにさけます流し網禁止や捕鯨禁止の際に、強い政治的圧力の道具として使用してきた(日本遠洋いか漁業協同組合, 2008)。また、オーストラリアやニュージーランドも公海流し網に反対の立場をとるようになり、国際的な公海流し網禁止の動きとアメリカ政府の政治的な圧力も加わり(日本遠洋いか漁業協同組合, 2008)、国連決議で1993年から大規模な公海流し網漁業の一時停止(モラトリアム)となった(Burke *et al.*, 1994)。流し網が操業できなくなった1993年以降、廃業を余儀なくされる漁船に対して、日本政府は代替漁法によるアカイカ操業の継続が可能となるよう、表層曳きトロールによるアカイカ操業の試験操業許可を30隻に認めた。しかし、試験操業の結果、年間漁獲量は最大で0.6万トンに終わり(松下ら, 1995)、表層曳きトロールはアカイカの漁場には適していないことがわかった。以上の背景から日本近海でアカイカを対象とした釣り漁業が復活した。他方、アカイカの群は規模が小さく、分散している(本多・小松, 1978)。このような群れの特徴を考慮して、稲田ら(1996)は水中灯を利用した操業技術を構築した。さらに、アカイカは魚体が大きく重いため釣機や釣針の改良が行われ、本種に関する釣り漁

法の技術と漁場探索法が確立された(水産庁, 1994; 水産庁, 1995; 水産庁, 1996)。その結果、1994および1995年にはともに日本近海で年間約7万トンの漁獲が上げられた。170°E以東の旧流し網漁場においても、イカ釣り漁船が出漁するようになり、1995年以降年間0.2~2万トンを漁獲して重要度が増している。170°E以西の漁業の主体は、沖合で操業する中型イカ釣り漁船(30~185トン)である。1994~1998年は170°E以西で年間6万トン以上の漁獲量を上げたが、資源が急減した1999年以降は年間1~3万トンまで漁獲量が減少した(Fig. 2)。2001年以降、収益性の低下にともなう操業経費の増加が公海域の日本漁船を減少させる結果となっている(Kurosaka *et al.*, 2012)。したがって、漁業の主力である中型イカ釣り漁船の減少およびスルメイカ釣り操業等との兼業もあり、アカイカの漁獲量は多くない(酒井, 2012)。この背景には1999年に北太平洋で起きたレジームシフトに関連する基礎生産力の低下(Minobe, 2002)や、外国漁船の増加による競合の激化がある(Ichii, 2006)と考えられる。最近では、台湾や中国の釣り漁船が日本のEEZ付近でアカイカを漁獲している(酒井, 2012)。台湾では、もともと流し網を用いた操業は少なく(酒井, 2012)、FAOの統計上でモラトリアム以前に年間7万トン(1992年)を超えることはなかった(Fig. 1)。モラトリアム以降では、2003年に年間9万トンを漁獲しているが、2011年には年間0.4万トンと漁獲量は減少している(Fig. 2)。中国漁船の隻数は1996年には年間約350隻、その後は約400~600隻(一井, 2002)に増加した。しかしその後、資源水準の低下に伴い出漁隻数はやや減少して、中国現地での聞き取り調査などから判断してここ数年は150~250隻程度が出漁していると考えられる(酒井, 2012)。これらの外国漁船による漁獲は、1995~2005年には8~11月にかけて7~13万トンが報告(Chen *et al.*, 2008)されている。

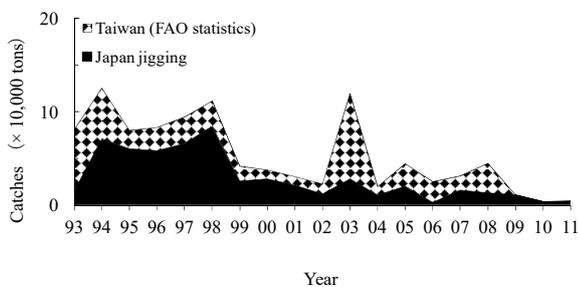


Fig. 2. Yearly Catch trends of neon flying squid in the North Pacific during 1992-2011 (Annual Statistics of Fishery and Fish Culture and FAO fishstat plus).

1.3 輸入動向

イカ類の輸入品は原材料、調整品、塩干品の3つに分類される。輸入実績は、原材料(モンゴウイカを除くその他のイカ類)が、2000年の年間5.4万トンと最高を記録し、2007年以降は年間3.2~3.7万トンと減少傾向にある(Fig. 3)。調整品は1990年に年間1万トンであったものが次第に増加し、2000年には年間2万トンを超え、2002年には年間3万トン台に、2004年には年間4万トン台へと着実に増加している。ミールを含むイカ類の塩干品は、1990年には年間6.3万トンを最高に、その後は年間3~5万トンの間をほぼ横ばい

で推移している (Fig. 3)。これは、原材料、塩干品が輸入割当 (IQ) の対象となっているのに対し、調製品はIQの規制対象外であること (日本遠洋いか漁業協同組合, 2008), 国内における加工産業の人件費等の高騰から、人件費の安い中国などに加工拠点を移し、イカのIQ対象外となる半製品あるいは完成品として日本に輸入することが活発になっていることを示している。

国別の日本へのイカ類調整品輸出量は、中国が1990年に年間0.2万トン足らずであったものが、2000年には年間1.5万トン、2002年には年間2.2万トン、2005年には年間3.6万トンと著しい増加を示している (Fig. 4)。

さらに、中国から日本へのイカ類輸出の全体量を見ると、上述した調製品が一番多く、2007年に年間3.9万トンに達し、その後も年間3.5~3.8万トンを維持している (Fig. 5)。次いで原材料であるイカ類 (活イカ, 生鮮, 冷凍品) で、2000年に年間2.4万トンの最高を記録し、その後は年間1~2万トンの範囲にある (Fig. 5)。イカ加工原料の価格は、1990~1996年までに、キロ当たり500円を超える価格であったが、2001年以降、概ね400円台半ばの価格帯を維持している (日本遠洋いか漁業協同組合, 2008)。

これらの中国からの輸入数量は、製品重量であるため必ずしもイカ類そのものの重量を示しているわけではない。そこで、2011年の輸入量 (イカ類の原材料 (活魚, 生鮮, 冷凍品) 3.2万トン, 調製品3.8万トン, 塩干品0.03万トン) を原魚換算した。その結果、合計して9.9万トンが国内に搬入されていると推定でき、このうちの相当部分をアカイカが占めるものと考えられる。

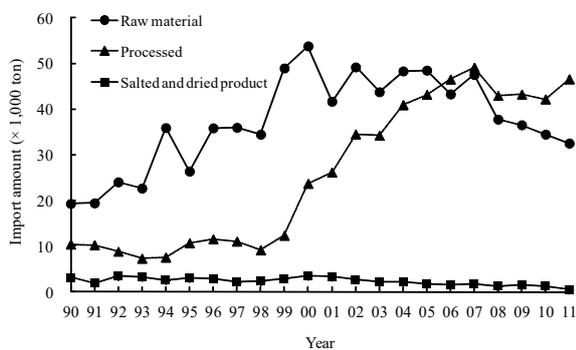


Fig. 3. Yearly trends of import squid products during 1990–2011 (Annual statistics of fishery and fish culture and Marine product power data book).

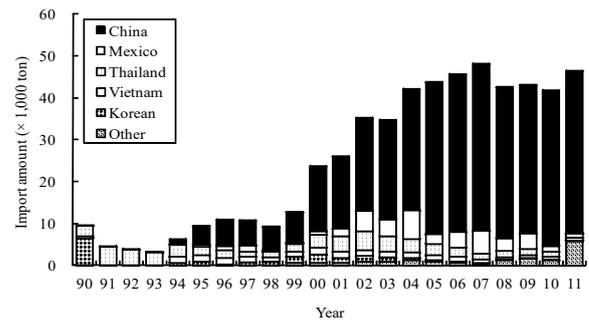


Fig. 4. Processed squids imports Japan, according to the countries, during 1990–2011 (Annual statistics of fishery and fish culture and Marine product power data book).

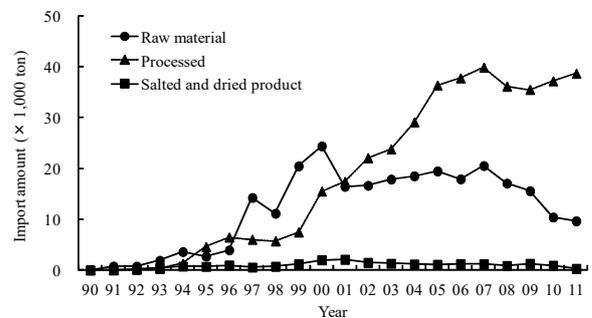


Fig. 5. Total imports (raw material, processed, salted and dried product) from China to Japan during 1990–2011 (Annual statistics of fishery and fish culture and Marine product power data book).

1.4 外国漁船との競合

北太平洋では1997年に約300隻、2000年には約1,000隻の漁船団がアカイカ漁業に参入したとみられる (上野・酒井, 2010)。一方で操業の問題も多い (黄金崎, 2002)。日本では漁場を見つけた際は、最初に見つけた者に優先権があり、後続の者は先着の船より3マイル以上の船間距離をおいて操業を行っている (黄金崎, 2002)。他方、外国漁船は自ら漁場を見つける例は少なく、日本漁船の操業位置に向けて集結する場合はほとんどで、操業海域に入ってきた場合、1マイル間隔に10隻ほどが集まってくる (Fig. 6)。また、中国漁船については、10~13隻が1つの船団となり、操業船 (Fig. 7a) と漁獲物を集める中積み船 (Fig. 7b) から構成されている (黄金崎, 2002)。一方で、公海で禁止されている流し網を積載している外国漁船 (Fig. 8) が北太平洋のアカイカ漁場で確認されている。

北太平洋のアカイカ漁場は外国漁船の出漁隻数が

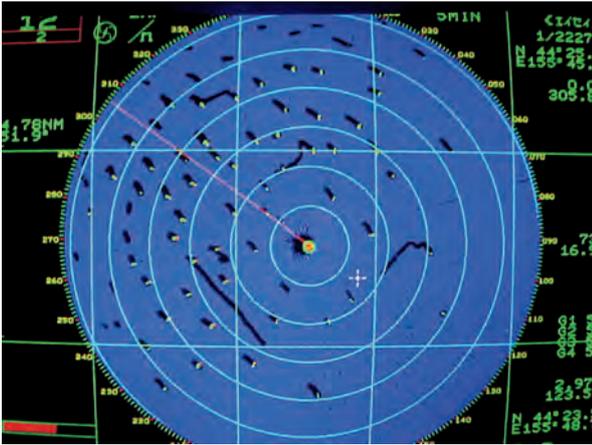


Fig. 6. Foreign fishing fleets for neon flying squid are operating within 6 mile radius based on Hakurei-maru No.8 on September 21th, 2005 in North Pacific.



Fig. 8. Foreign illegal driftnet boats in North Pacific (44° 25' North Latitude, 155° 42' East Longitude) on September 21th, 2005. Provision of photographs by JAMARC.

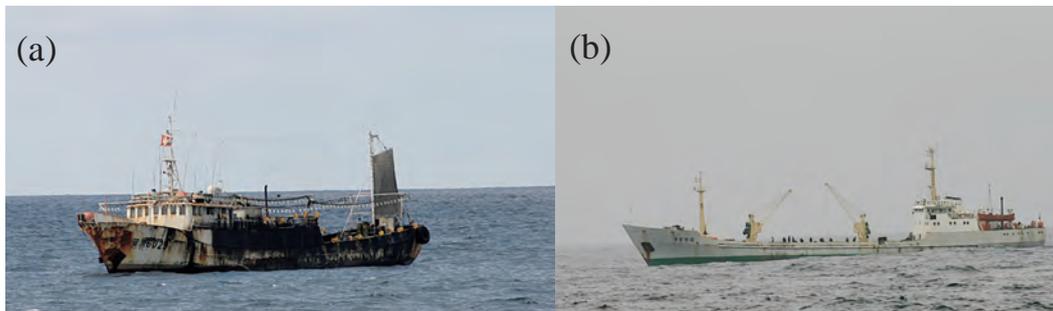


Fig. 7. (a) Chinese commercial squid jigging boats in North Pacific.
(b) Chinese carrier boats for neon flying squid in North Pacific.

年々増大し、かつ操業海域も拡大しつつあり、もはや日本漁船だけの漁場でなくなっている（黄金崎, 2002）。これらの海域における資源を持続させ有効利用していくことが、イカ釣り漁業全体の経営安定にもつながっていくものと考えられる。このためにも北太平洋のアカイカ操業について操業秩序の確立が急がれるとともに、北太平洋のアカイカ資源の国際管理体制の構築が急務である。そこで、以下に述べるような項目に沿って研究を実施した。

1.5 本研究の概要

本研究はアカイカの釣獲技術の向上を目的として、操業現場で多発する釣り落とし現象、すなわち脱落の発生機構とその対策を明らかにしたものである。

第I章では、北太平洋のアカイカの変遷と漁業実態について明らかにし、北太平洋のアカイカ資源の国際管理体制の構築が必要であることを指摘した。第II章では、資源の管理方策について検討するため、ミ

トコンドリアDNA分析の塩基配列から推測したアカイカの集団構造について解析した。以上の2章をもとに、アカイカ資源の適切な漁業管理を行うには、北太平洋のイカ釣り操業過程の実際を理解し説明する必要がある。そこで第III章では、触腕破断による釣り落としの減少を目的として擬餌針の巻上げ過程の観測結果から、アカイカの脱落現象と脱落の発生要因について明らかにした。さらにロジスティック式を適用して外套背長と脱落率との関係を求め、擬餌針から脱落する50%脱落率 (F_{50}) 時の外套背長を推定した。第IV章では脱落率と船体運動との関係を検証することとし、船体運動が脱落に及ぼす影響を具体化するためにロジスティック回帰分析を行った。第V章では加速度ロガーを使用して船体および釣具の運動を計測し、船体の運動が釣具に伝搬されているのかの検証を行った。検証にあたっては、ガイドローラーおよび釣具ラインにて記録される加速度信号の特性を調べるために、高速フーリエ変換 (FFT) によるパワースペクトル密度 (PSD) の計算を行った。第VI章では、脱落を低減

するためイカ釣機を利用する釣具ラインの上昇速度に着目し、擬餌針からのアカイカの脱落を低減するために、巻上げ過程における釣具の運動とアカイカの針掛かり状態との関係を把握した。第Ⅶ章では、釣獲過程におけるアカイカの脱落現象を低減する方策として、釣具の巻上げ回転数に着目し、毎分50~80回転の条件で6段階にこの回転数を変化させて操業試験を行い、脱落率との関係について調べた。さらに、アカイカが触腕で擬餌針を捕捉する釣具ラインの上昇速度を推定するため、触腕による捕捉率（針掛かり個体総数に占める触腕による擬餌針捕捉個体数の割合）と釣具ラインの上昇速度との関係を検討した。その結果より、擬餌針を捕捉したアカイカのうち半数が触腕で捕捉した場合の釣具ラインの上昇速度、すなわち50%触腕捕捉率（ R_{50} ）時の上昇速度を推定した。この結果を踏まえて実証試験を行い、脱落を低減させる有効な方法であることを解析結果と実証例とともに提案した。

第Ⅷにおいて本研究を統括し、漁業管理への応用と今後の展望や問題点について考察することとした。な

お、本研究を通してアカイカの釣獲過程は以下のように理解された。

アカイカ釣り漁業を例にとった釣獲過程のネットワークモデルをFig. 9に示した。対象魚がある行動を起こすための条件となる生理的な内部要因、そして外的環境要因によって釣具の条件が変化して対象魚の生理的要因が関与していく道筋を示したもので、釣獲に至るまでの一連の過程をまとめた。アカイカの釣獲過程は、採餌行動、擬餌針の視覚認知、接近、捕捉、針掛かり、釣獲/脱落から成る。

本研究ではこの一連の釣獲過程のうち、捕捉から釣獲/脱落に至るまでの過程について明らかにした。

アカイカは、釣具ラインの上昇速度が1.75m/sよりも速い場合、外套背長35cm以上の大型サイズでは、触腕による擬餌針捕捉を行い、その後漏斗による強い海水吐出推進力で釣具ラインの上昇に対応し、触腕以外の他腕を使ってしっかりと擬餌針を抱き込むものと推察した。他方、外套背長35cm未満の小型サイズでは吐出推進力が劣るために、擬餌針の上昇に対応で

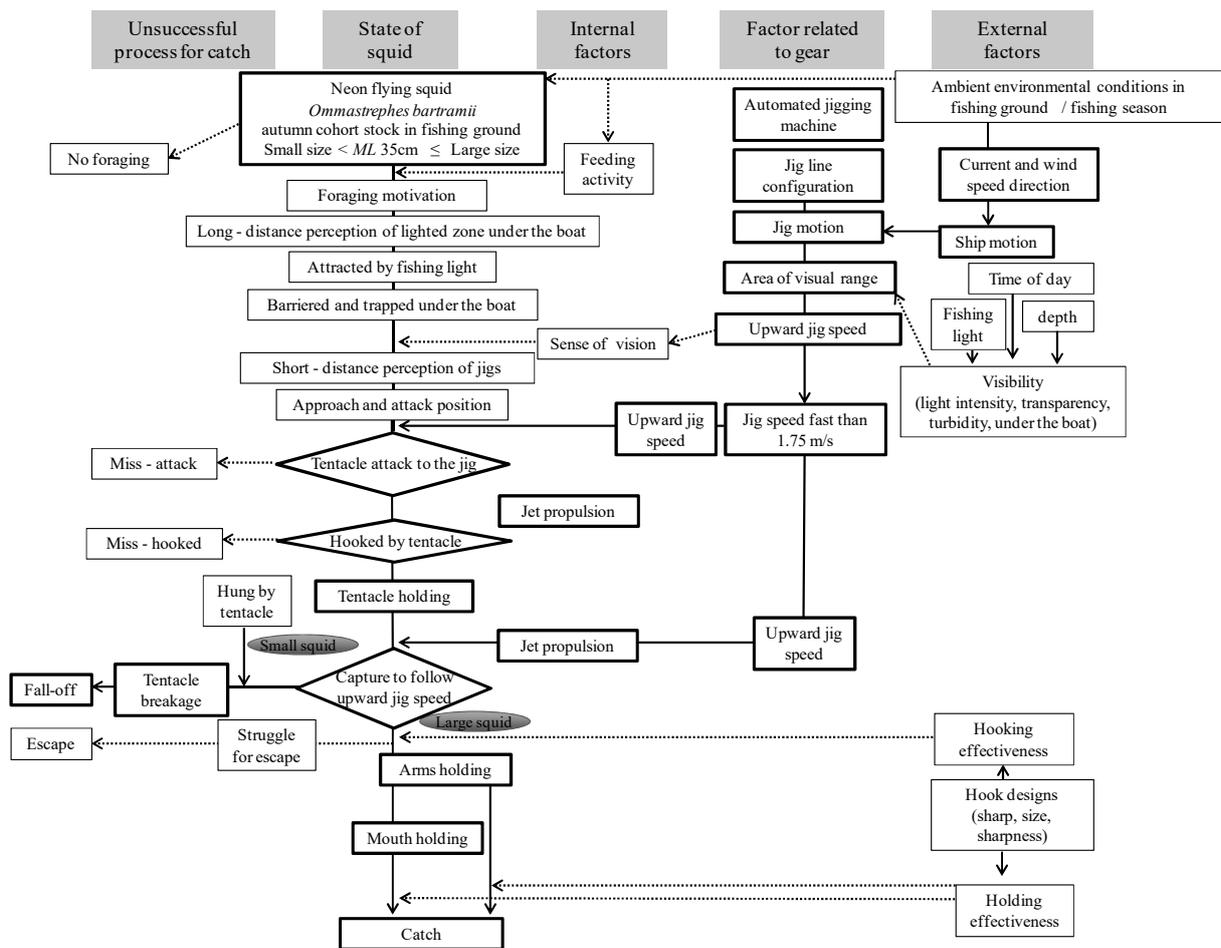


Fig. 9. Network model on capture process of neon flying squid in jigging fishery.

きずに触腕のみで引き上げられる状況になり、そこで触腕破断強度が小さいため、破断して脱落する割合が高いことがわかった。この釣獲過程における水中の触腕破断は、触腕を伸ばして擬餌針を捕捉した後に、釣具ラインの巻上げ・上昇にともなう自重や流体抵抗に加え、海水吐出による推進力で逃避する際に触腕に過大な負荷がかかることも加わり、脱落すると推察した。

第Ⅱ章 ミトコンドリアDNA分析の塩基配列から推測したアカイカの集団構造

2.1 緒言

前章で述べたように、北太平洋海域のアカイカについては、日本船の漁獲量が減少している状況のもとで、外国漁船の操業隻数が多く、漁獲量も増加傾向にある。このことからアカイカ釣り漁業が持続できるように適切な漁業管理方策の策定が望まれている。漁業管理について検討するためには詳細な資源構造を把握する必要がある。これまで当該海域のアカイカの産卵場は、南西諸島から小笠原諸島周辺、ハワイ諸島周辺の2カ所があり、それぞれ秋生まれ群と冬春生まれ群が対応することが知られている(谷津ら, 1998)。それぞれの群は南北に季節的な移動を行い、春季から夏季にかけては北上して魚類、頭足類、甲殻類などを捕食する接餌回遊を行う。また、秋季から冬季にかけては南下する産卵回遊を行うと報告されている(村田・中村, 1998)。アカイカの集団構造については、アイソザイム分析の結果から太平洋の西部と東部の海域で対立遺伝子頻度に差があると報告

されている(Katugin, 2002)。また、寄生虫を利用した集団解析では、秋生まれ群には中部北太平洋系群と東部北太平洋系群が存在すると報告されている(長澤ら, 1998)。現在、水産庁による資源評価では、秋生まれ群は一つの群れとして扱われ、プロダクションモデルを用いてMSYを推定して資源を管理している(Ichii *et al.*, 2006)。しかし、北太平洋のアカイカは重要な国際資源であり、より正確な資源評価を行うためには、資源構造を再確認する必要がある。今回、海洋水産資源開発調査によって、北太平洋の日付変更線の東西に渡る広い範囲でアカイカが採集できたので(黒坂ら, 2009)、それらのサンプルを用いて、ミトコンドリアDNA(mtDNA)の塩基配列分析によって集団構造を明らかにすることを目的とした。

2.2 材料と方法

本研究で用いた標本は、海洋水産資源開発調査を行った際に得られたものである(黒坂ら, 2009)。この調査は2008年6-9月に、中・西部北太平洋海域(Lat. 40°-46°N, Long. 150°E-170°W)において、(独)水産総合研究センターが用船した第八白嶺丸(276GT)で実施した。また、インド洋で採集したアカイカについては、2009年10月-2010年9月に、南インド洋西部公海域(Lat. 20°S-50°S, Long. 30°E-70°E)において、(独)水産総合研究センターが用船した第五十八富丸(401GT)で採集したものである(蝦名ら, 2010; 蝦名ら, 2011)。採集したアカイカは、船上で外套背長を測定し、触腕とその他の腕を切り取り冷凍保存した。これらのサンプリング日時・採集位置をFig. 10とTable 1に示した。

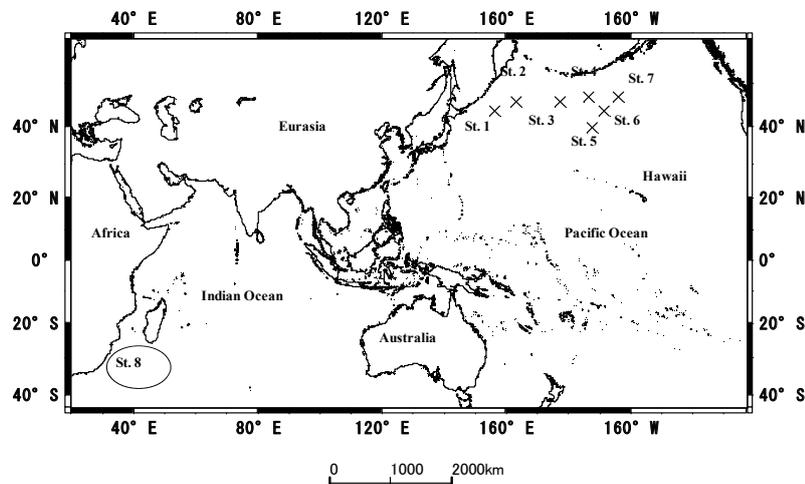


Fig. 10. Sampling locations of neon flying squid.

Table 1. Sampling information and population genetic parameters of neon flying squid based on nucleotide sequence analysis of mtDNA ND1-16SrRNA gene regions

St.	Date	Latitude	Longitude	Number	h^*	Hd^*	K^*	Pi^*
1	2008/9/20	43-28.9 N	156-18.2 E	23	10	0.8854	3.0590	0.0027
2	2008/9/17	45-10.9 N	163-00.2 E	19	7	0.8187	2.6780	0.0024
3	2008/9/4	45-59.7 N	177-06.6 E	9	6	0.9167	3.5560	0.0032
4	2008/7/27	46-04.5 N	173-47.7 W	20	8	0.8053	3.2000	0.0028
5	2008/6/2	39-40.7 N	172-25.3 W	50	13	0.8776	3.0408	0.0027
6	2008/7/15	43-11.1 N	168-43.4 W	24	10	0.8804	3.0145	0.0027
7	2008/8/16	46-59.5 N	164-01.7 W	22	10	0.8053	3.6150	0.0032
8	2009/10-2010/9	34-36S	40-50E	8	2	0.2500	0.2500	0.0002
Total				175	32	0.8807	4.2175	0.0037

* h , Hd , K , and Pi indicate number of haplotypes, haplotype diversity, average number of nucleotide differences, and nucleotide diversities, respectively.

サンプルは、研究室で筋肉約50mgを切り出して QuickGene (Fujifilm) を用いて、DNAを抽出した。DNAをテンプレートとして、mtDNA遺伝子領域の ND1下流から16S rRNAの半ばにかけてPCRを行った。既存のスルメイカ (AB240152) (Akasaki *et al.*, 2006) とアメリカオオアカイカ (EU068697) (Staaf *et al.*, 2010) のmtDNAの塩基配列情報から、2種で保存されている配列にプライマーTP11249L (5' -cat cag cca aag gtt gag gt-3') と TP12504H (5' -tta ttg cat ggg gga taa gc-3') を設計した。また、Folmer *et al.* (1994) のプライマーLCO1490 (5'-ggt caa caa atc ata aag ata ttg g-3') と HC02198 (5'-taa act tca ggg tga cca aaa aat ca-3') を用いて、mtDNAの COI遺伝子領域をPCR法で増幅した。サーマルサイクラーにはABI9700 (Applied Biosystems) を用いた。PCR反応は、94度2分加熱後、94度30秒、55度30秒、72度2分を30サイクル行い、最後に72度で7分加熱した。PCR反応溶液は、テンプレートDNA溶液 1 μ l, 2.5mM dNTP溶液2.5 μ l, 10 \times PCR Buffer (TaKaRa) 2.5 μ l, 50mMの各プライマー0.5 μ l, TaKaRa Ex Taq Polymerase 0.125 μ lに、総量が25 μ lになるように超純水を加えたものを用いた。PCR産物を1.5% アガロースゲル (NuSieve3: 1, TaKaRa) で電気泳動し、エチジウムブロマイド染色によって増幅産物の確認をした。増幅産物は、Quick PCR Purification Kit (Qiagen) を用いて精製した。PCRで使用した同じプライマーを用いてBig Dye Terminator cycle sequencing kit version 3.1によってシーケンス反応を行い、ABI3130XL (Applied Biosystems) で塩基配列を決定した。得られた塩基配列から、CLUSTAL W (Thompson *et al.*, 1994) によりアライメントを行った後、DnaSPVer4.10.9 (Rozas *et al.*, 2003) を用いてハプロタイプの分類を行った。

海域間の遺伝的分化を検討するため、AMOVA (analysis of molecular variance) 分析 (Excoffier *et al.*, 1992), ペアワイズの F_{ST} 分析 (Weir and Cockerham, 1984), 及びExact test (Raymond and Rousset, 1995) を行った。遺伝的変異性の指標としてハプロタイプ多様度 (Nei and Tajima, 1981) と塩基多様度 (Nei, 1987) を求めた。これらの分析には、Arlequin Ver. 3.1 program (Excoffier *et al.*, 2005) を用いた。MEGA5.0.5ソフトウェア (Tamura *et al.*, 2011) によって、Kimura two-parameter法 (Kimura, 1980) によって海域間の遺伝距離を求めて、NJ法 (Saito and Nei, 1987) により海域間の関係を求めた。また、TCS Ver1.2.1 (Clement *et al.*, 2000) によって、信頼限界95%でハプロタイプネットワーク図を作成した。

北太平洋のアカイカは外套背長組成によって、5月の時点では外套背長30cm以上が秋生まれ群、30cm以下が冬春生まれ群、8月の時点で34cm以上が秋生まれ群、30cm以下が冬春生まれ群とされている (Murata and Hayase, 1993)。そこで、St. 1-3は9月に、St. 4-7は7-8月に操業を行っているため、34cm以上を秋生まれ群、34cm未満を冬春生まれ群として取り扱った (Table 1)。St. 6は6月に採集を行っているため、30cm以上を秋生まれ群として取り扱った。秋生まれ群と冬春生まれ群に遺伝的な差異がないか、ペアワイズの F_{ST} 分析 (Weir and Cockerham, 1984), Exact test (Raymond and Rousset, 1995), 及びRoff and Bentzen (1989) の χ^2 検定によって検討した。

2.3 結果

Folmer *et al.* (1994) のプライマーではmtDNAのCOI領域約710bpを増幅することができたが、シーケ

ンス分析で得られたフェログラムで綺麗な波形が得られず、塩基配列を決定することができなかった。そのため、COIは使用せずND 1 から16S rRNAの領域を用いて解析を行った。PCR法でND 1 の下流から16S rRNAの半ばまで約1,126bpの大きさの産物をPCR法にて増幅することができた。増幅したPCR産物から塩基配列分析を行い、175個体の塩基配列を決定した。増幅した領域は1～95がND1、96～165と172～238がtRNA-Leu、239～1,126が16S rRNA領域であった (Table 2)。得られた塩基配列の採集位置ごとのサンプル数、ハプロタイプ数 (h)、ハプロタイプ多様度 (Hd)、平均塩基置換数 (K)、塩基多様度 (Pi) をTable 1に示した。得られたハプロタイプは32個で、ハプロタイプ多様度は0.8807で、平均塩基置換数は4.2175で、塩基多様度は0.0037であった。インド洋のサンプルについては、出現したハプロタイプは2個で、ハプロタイプ多様度は0.2500と小さかった。得られた塩基配列はDNAデータバンクにAB509422からAB509451とAB635465、AB635466で登録した。

採集海域ごとのハプロタイプの頻度とハプロタイプの変異部位をTable 2に示した。北太平洋で出現したハプロタイプは30個あり、インド洋で出現したハプロタイプは2個であった。両大洋に共通するハプロタイプは認められなかった。インド洋のハプロタイプOB31とOB32の8カ所の変異部位は北太平洋の塩基配列と異なり、インド洋特有の塩基置換と考えられた。北太平洋では、OB 1～4、12～13の6個のハプロタイプの出現頻度が高かった。これら以外のハプロタイプは出現頻度が1～2個と低いマイナーのハプロタイプであった。

ハプロタイプネットワーク図をFig. 11に示す。OB 1、OB 2、OB 3の主要なハプロタイプがあり、それぞれに1塩基置換程度の違いのあるハプロタイプが派生する星状ネットワークであった。大きく3つのクレードに分けられることが分かった。インド洋のハプロタイプOB31とOB32は北太平洋のハプロタイプとは大きく離れていることが分かった。また、北太平洋の集団を特定するような、ハプロタイプはなかった。

標本採集位置間に遺伝的差異があるかどうかをAMOVA分析によって検討した結果、標本採集位置間の差異によって生じている変異の割合は31.72% ($P = 0$) となり、有意に大きな値であった。標本採集位置間の F_{ST} 値とExact Testの P 値をTable 3に示す。ボンフェローニの多重解析の補正を行って、海域間に有意差がある ($P < 0.05$) 組み合わせを調べた。St. 8のインド洋と北太平洋の各海域に有意差があった ($P < 0.01$)。しかし、北太平洋の採集位置間には有意差は

なかった。

次に、北太平洋の採集位置間に遺伝的差異があるかどうかをAMOVA分析によって検討した結果、標本採集位置間の差異によって生じている変異の割合は0.53 ($P = 0.312$) となった。北太平洋の採集位置間についてボンフェローニの多重解析の補正をおこなって採集位置間の有意差がある組み合わせを調べたところ (Table 3)、有意な差がある組み合わせはなかった。しかしながら、 F_{ST} 値とExact Testの P 値はSt. 1-7などで低い値であった。また、Kimura two-parameter法によって求めた遺伝距離から海域間の関係をNJ法で系統樹を作成した (Fig. 12)。インド洋のSt. 8は北太平洋と遺伝的に大きく離れていることが分かった。北太平洋の海域間の違いは非常に小さいものの、一番西のSt. 1と一番東側のSt. 7、一番北側のSt. 4の海域が離れていた。他の海域も西から東と物理的な距離に従って、クラスターを形成している傾向があった。

F_{ST} 値とExact Testの P 値と、NJ treeの結果から一番西のSt. 1と一番東側のSt. 7、一番北側のSt. 4の海域が離れていた。そこで、St. 1と他の海域、St. 7と他の海域などのように、北太平洋海域を大きく東と西に振り分けてAMOVA分析を行った (Table 4)。その結果、様々な海域に分けて解析しても、採集海域間に有意差はなかった。また、秋生まれ群と冬春生まれ群のハプロタイプ頻度について χ^2 検定を行ったところ、 P 値は0.098となり、5%で有意差はなかった。

2.4 考 察

アカイカ科を含む頭足類の開眼亜目の塩基配列では、COI領域などがmtDNA内に2カ所存在することが報告されている (Akasaki *et al.*, 2006; Staaf *et al.*, 2010)。その2カ所のどちらかに変異があれば、ダイレクトシーケンスでは、正確な塩基配列が得られないことになる。本研究で調べたアカイカでも、シーケンス分析で得られたフェログラムで綺麗な波形が得られず、mtDNAにCOI領域が2箇所存在することが推測される。そのため、本報告では集団解析にCOI領域を用いなかった。

頭足類では、魚類の集団解析で用いられる約1,000bpの長さのD-Loop領域のような領域がなく、スルメイカ (Akasaki *et al.*, 2006) やアメリカオオアカイカ (Staaf *et al.*, 2010) では短いnon-coding領域もほとんどない。そのため、本報告ではmtDNAに重複のない領域において新たに集団解析用にマーカーを作成した。本研究で分析したND 1～16S rRNA領域は、PCR法で再現

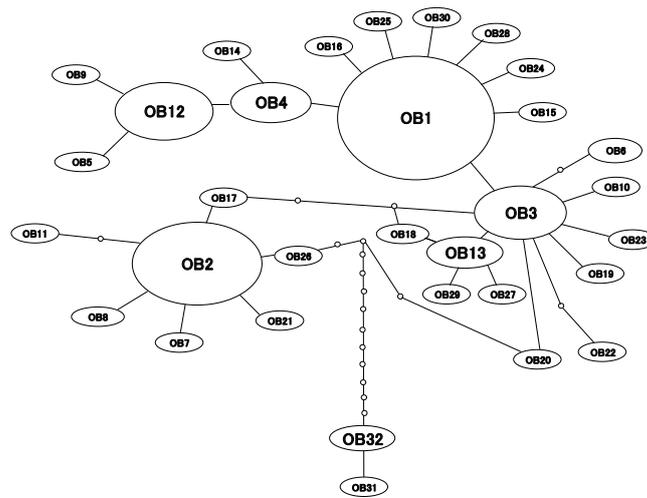


Fig. 11. Minimum spanning tree showing the genetic relationship in neon flying squid. Size of circles roughly represents haplotype abundance. Open dots on the lines joining haplotypes indicate intermediate haplotypes not found in this study. The marks in each circle represent the haplotype name.

Table 3. Pairwise F_{ST} estimates (below diagonal) and probabilities of Fisher's exact test (above diagonal) for population differentiation in neon flying squid base on the nucleotide sequence analysis of mtDNA ND 1-16SrRNA

	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8
St. 1		0.150	0.326	0.121	0.192	0.265	0.028	0.000**
St. 2	-0.016		0.198	0.417	0.662	0.696	0.439	0.000**
St. 3	-0.039	-0.055		0.044	0.226	0.236	0.109	0.000**
St. 4	0.098	0.055	0.036		0.595	0.553	0.274	0.000**
St. 5	-0.004	-0.019	-0.031	0.033		0.458	0.188	0.000**
St. 6	-0.004	-0.013	-0.023	0.028	-0.021		0.229	0.000**
St. 7	0.048	0.012	-0.008	-0.027	0.006	0.006		0.000**
St. 8	0.846**	0.873**	0.869**	0.842**	0.834**	0.850**	0.820**	

*significant at $P < 0.05$ after Bonferroni correction

**significant at $P < 0.01$

Table 4. Hierarchical analysis of molecular variance (AMOVA) of mtDNA ND1-16SrRNA gene regions in neon flying squid from the North Pacific Ocean for the number of St., see Table 1 and Fig. 10

Region groupings	ϕ_{CT}	Percentage variance among groups
(St. 1, St. 2, St. 3, St. 4, St. 5, St. 6) VS (St. 7)	0.00517	0.52
(St. 1, St. 2, St. 3, St. 4, St. 5) VS (St. 6, St. 7)	-0.00168	-0.17
(St. 1, St. 2, St. 3, St. 4) VS (St. 5, St. 6, St. 7)	-0.00288	-0.29
(St. 1, St. 2, St. 3, St. 5) VS (St. 4, St. 6, St. 7)	0.00495	0.5
(St. 1, St. 2, St. 3, St. 5, St. 6) VS (St. 4, St. 7)	0.00894	0.89
(St. 1, St. 2, St. 3) VS (St. 4, St. 5, St. 6, St. 7)	0.00484	0.48
(St. 1, St. 2) VS (St. 3, St. 4, St. 5, St. 6, St. 7)	-0.00184	-0.18
(St. 1) VS (St. 2, St. 3, St. 4, St. 5, St. 6, St. 7)	0.01366	1.37

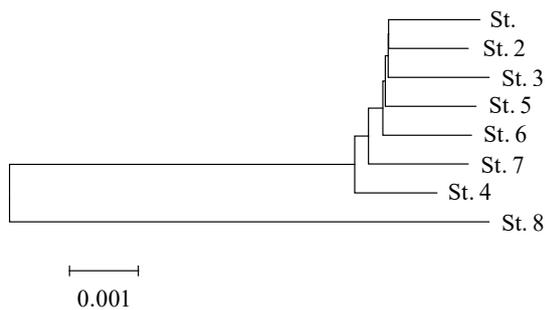


Fig. 12. NJ tree of neon flying squid samples based on nucleotide sequence data of mtDNA ND1-16S rRNA region. St. 1 to St. 7 are in the North Pacific, and St. 8 in the Indian Ocean. See text for detail

性よく増幅し、容易に塩基配列も決定することができた。D-Loop領域と比べると変異性は低かったが、一般的に報告されている16S rRNA領域の変異性と比較すると（松井・小池, 2003）、今回出現したハプロタイプ数は32個と多く、またハプロタイプと塩基多様度も高かった。このことから、海域間の遺伝的な変異性を比較できるものと考えられた。

インド洋と北太平洋の集団を比較すると、出現ハプロタイプは異なり、平均塩基置換数は約15であった。ハプロタイプ出現頻度から、インド洋の集団は北太平洋集団に比べ、有意に遺伝的に異なっていた。インド洋のアカイカはインド洋のマダガスカル島周辺に広く分布している（奥谷, 1995）。また、北半球と南半球におけるアカイカの分布は連続していないので（奥谷, 1995）、遺伝的に隔離されていることが推測される。南インド洋には、西流する南赤道海流、マダガスカル島付近には南赤道海流から分岐したモザンビーク海流とその続流であるアグリアス海流がアフリカとマダガスカルの間を南へ流れ（Shotton, 2006）、その南では東へ流れる南極周極流があり、オーストラリアの南端には北向きに流れる海流があって、オーストラリアの北側には西向きに流れる海流がある。このように、インド洋には反時計回りに循環する南インド洋海流があり（平, 1997）、南インド洋のアカイカ集団は環流によって他の海域の集団と遺伝的に独立している可能性が考えられた。

一方、北太平洋におけるアカイカは20°-40°N付近の東西に広く分布しているが（奥谷, 1995；酒井, 2010）、産卵場や稚仔などの分布の違いから小笠原近辺とハワイ周辺の集団に分かれる（谷津ら, 1998）。また、それぞれの集団は孵化時期が秋と冬春に分かれるため、秋生まれ群と冬春生まれ群の計4集団に分かれると報告されている（谷津ら, 1998；

村田・中村, 1998）。しかし、本研究によれば、 F_{ST} 値、Exact testでも海域間に差はなかった。海域を東から順に、北から順にという具合に大きな様々な集団を仮定して集団解析を行った結果（Table 4）、集団間に有意な差異が認められなかった。北側の集団は外套背長が30cm以上の大型の個体が多く、調査時期とその外套背長から秋生まれと推測された。そこで、外套背長30cm以上を秋生まれ群、30cm未満を冬春生まれ群と分けて（Murata and Hayase, 1993）、それぞれが独立しているか検討したところ、有意差は検出できなかった（Table 3）。これらの結果から、北太平洋に分布するアカイカは、一つの大きな集団である可能性が考えられた。ただし、今回のデータについては、秋生まれと冬春生まれを外套背長で簡易に分けただけであり、耳石の日周輪を用いて詳細な生まれた時期を組み合わせることによって、秋生まれと冬春生まれとの遺伝的な差が検出される可能性もあり、今後の課題である。

本章では北太平洋のアカイカ資源の管理方策について検討するために、詳細な資源構造を把握した。これらの知見をもとに、資源の適切な漁業管理を行うには、北太平洋のイカ釣り操業過程の実際を理解し説明する必要がある。アカイカ釣り漁業は、操業現場で多発する釣り落とし現象、すなわち脱落が多発するため釣獲向上の低下を招いている。次章では、脱落現象の発生要因を解明するために釣獲過程におけるアカイカの触腕破断機構を明らかにした。

第三章 釣獲過程におけるアカイカの触腕破断機構

3.1 緒言

第II章では、北太平洋のアカイカ資源の管理方策について検討するために、詳細な資源構造を把握した。これらの知見をもとに、資源の適切な漁業管理を行うには、北太平洋のイカ釣り操業の釣獲過程の実際を理解する必要がある。アカイカ釣り漁業では、イカ釣機で釣り上げられる際に触腕が切断され脱落することが多く（上野・酒井, 2010）、釣獲向上の低下を招いている。イカ釣り漁業の収益性を改善するためには、釣獲過程の獲り逃がしを最小化する必要がある。これまで獲り逃がしの最小化を図るため、針笠の形状や大きさを改良した新しい針笠を開発した報告（Guo *et al.*, 1997；Yada *et al.*, 1997）もあるが、実用には至っていない。

本研究では釣獲されたアカイカの針掛かり状態を観察して、アカイカが釣獲されるまでの過程と脱落に至

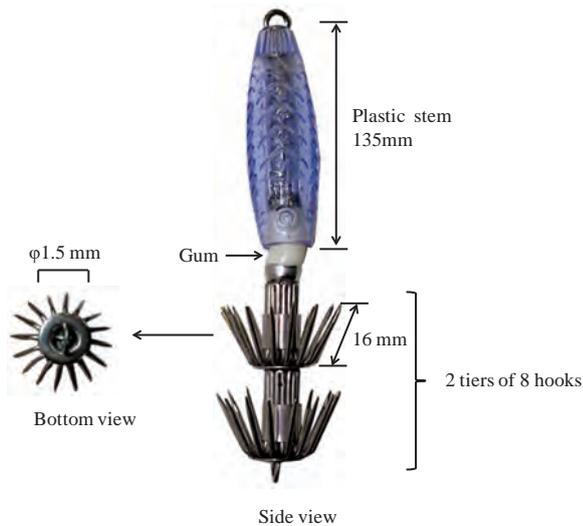


Fig. 13. Neon flying squid jig.

る過程を推定し、アカイカの触腕破断機構を調べた。同時に脱落現象の発生要因を特定するために触腕破断強度を測定し、これらを総合して釣獲過程におけるアカイカの触腕破断機構を明らかにした。

3.2 材料と方法

2006年6月6日～9月30日の間、中・西部北太平洋海域（40°～46°N, 150°E～170°W）において、（独）水産総合研究センターが用船した第八白嶺丸（276GT, 56mLOA）で実施した。第八白嶺丸では、船首から船尾にかけて右舷22台、左舷21台の自動イカ釣機MY-10（株式会社 東和電機製作所）を配置していた。

各釣機は、15個の擬餌針を取付けた釣具ラインを繰り出し・巻上げるための八角ドラムが両舷に2個ずつ備わっている。ただし、アカイカの個体重量が5kg前後となり、釣具ラインが近いとラインが互いに絡まりやすくなるため、調査操業には船首側のドラム一機のみを使用した。針掛かりしたアカイカは、受け台先端のガイドローラーを経由して、八角ドラムの回転によって巻上げられる。この調査操業に使用した擬餌針は、ムラサキベーク組立針（台和漁具製；CM-21）である（Fig. 13）。イカ釣機の巻上げ回転数は毎分65回転とした。

3.2.1 釣獲と脱落状況の観察

釣獲と脱落状況の観察は、2006年6月23日～9月25日の間、右舷側の22台の釣機を対象とし、日没30分後から2時間行った。観察回数は計36回（72時間）で

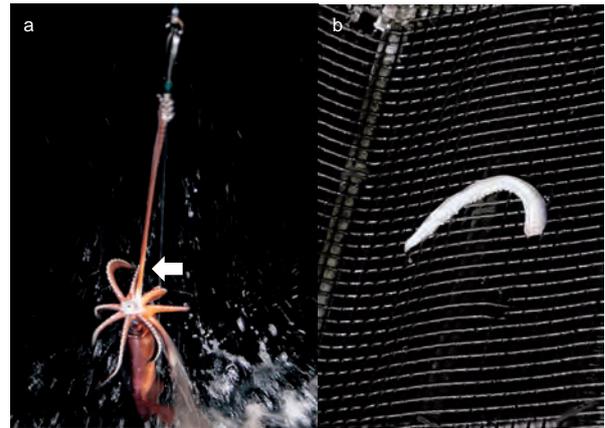


Fig. 14. a. A photograph showing the elongation of the tentacle above the surface. b. The remaining tentacles left on the rack as an indication of the breakage point.

あった。擬餌針の巻上げ過程の観測結果から、アカイカの脱落現象を以下の3パターンに分類した。擬餌針に触腕のみが掛かって巻上げられてきたものを「水中脱落」、海面から出てガイドローラーに触れる前に脱落したものを「水上脱落」、アカイカがガイドローラーに接触した際の脱落を「接触脱落」とした。これらの脱落状態を観察し、記録した。Fig. 14aは、針掛かりしたアカイカの触腕が伸長して、水上で破断する直前である。Fig. 14bに示されているように、受け台に残った触腕の破断箇所を特定するため注意深く観察すると、ほとんどが口部近くの触腕基部であった。Fig. 15aでは、失われた2本の触腕の破断箇所が示されており、Fig. 15bでは触腕先端の再生部分を示している。

3.2.2 体サイズと脱落率

脱落と体サイズの関係把握するため、釣獲されたアカイカの外套背長（ ML ）と体重（ BW ）を測定した。次に釣獲個体と脱落個体の触腕をサンプリングし、触腕掌部長（ TCL ）を測定した。Fig. 16に示したように、触腕掌部基部の最初の吸盤位置から触腕掌部先端部までを触腕掌部長とした（Roper and Voss, 1983）。釣獲したアカイカの ML と TCL の関係から、脱落して触腕のみが釣られた個体の ML を推定し、体サイズと脱落率との関係を求めた。

脱落個体の総数については、一定時間内に船上に揚がった水中脱落個体の触腕を回収し、 TCL を測定した。釣獲個体については、脱落個体測定時に釣獲されたもののうち、60個体の TCL および ML を測定した。

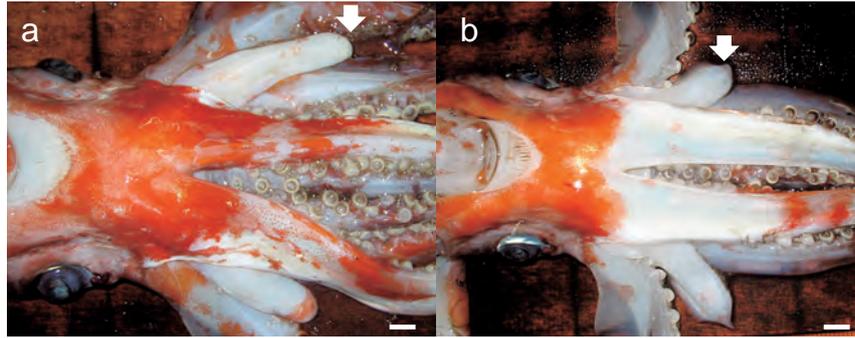


Fig. 15. a. An indication of the breakage points at the proximal end of tentacles for squid having lost 2 tentacles. b. Squid with the regenerating patterns at the tip of the remaining parts of tentacles. The scale bar indicates 1 cm.

釣獲個体2,897個体の外套背長と触腕掌部長を測定し、その関係を求めて、脱落したアカイカの触腕掌部長から外套背長を推定した。なお、死後の筋肉収縮による測定誤差を避けるため、脱落個体、釣獲個体いずれの触腕も船上に揚がった時点から30分間放置して測定した。触腕は測定条件を同じくするため、放置にあたり釣獲個体の胴体部から予め切離した。

アカイカの ML と脱落率との関係を推定するため、釣獲したか脱落したかに着目した2項分布を仮定し、 ML と脱落率(%)との関係についてロジスティック式(Dobson and Barnett, 2008)に当てはめた。擬餌針に針掛かりしたアカイカの総数を N 、脱落率の割合を p とし、次式で表わした。

$$p = \left(\frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

ここで n は擬餌針に残った触腕から判断した脱落個体総数である。ロジスティック式曲線の a と β のパラメータは、 TCL (l) ごとに表わされる。

$$p = \left\{ \frac{1}{1 + \exp(a + \beta \times l)} \right\} \quad (2)$$

針掛かりした N 個体のうち、 n 個体が脱落し、 $N-n$ 個体が釣獲されたときの対数尤度 ($\ln L$) は次式で示される。

$$\ln L = \sum \{ \ln(N) - \ln(n!) - \ln[(N-n)!] + n \ln(\hat{p}) + (N-n) \ln(1-\hat{p}) \} \quad (3)$$

この値を最大にするパラメータを求めた。最大化にはMS-EXCELソルバーを用いた(東海, 1997)。漁具の選択性を示すロジスティック式においては、その特性を示す指標として50%選択体長 (L_{50}) や選択レンジが用いられる(Wileman *et al.*, 1996)。この解析方法にならって、針掛かりしたアカイカの総数のうち半

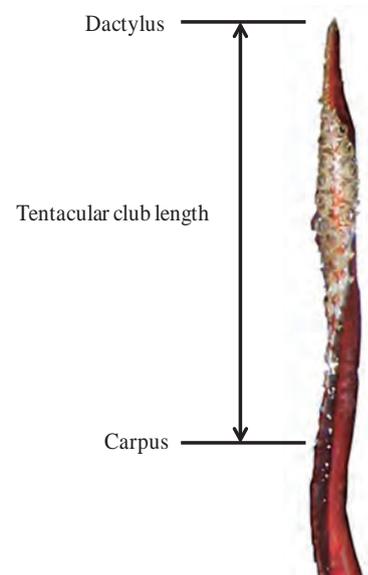


Fig. 16. A tentacular club of a neon flying squid.

数が脱落する触腕掌部長を50%脱落率 (F_{50}) と呼び、ロジスティック式パラメータ a と β を用いて次のように求めることができる(Sparre *et al.*, 1993)。

$$F_{50} = -\frac{a}{\beta} \quad (4)$$

次に、釣獲したアカイカから求めた線形回帰分析によって TCL を ML に換算した。

なお、モデルの適合性については、フルモデルの対数尤度からロジスティックモデルの対数尤度を引いた差(逸脱度)を2倍したものを用いた。ロジスティック式曲線から得られる脱落率が、フルモデルで最尤推定された体サイズごとに推定した脱落率と差がないことを示すことで、仮定した曲線が適合していることを示した(Dobson and Barnett, 2008; 東海, 2009)。

3.2.3 触腕破断強度の測定

Chen (1996) とChen *et al.* (2008) の方法を参考に、手秤（三光精衡所）に擬餌針を取り付けて触腕破断強度を測定した。アカイカのBW 1 kg未満には1 kgの手秤, BW 5 kg未満には5 kgの手秤, BW 5 kg以上には10kgの手秤をそれぞれ用いた。釣獲直後のアカイカについて一頭体ずつ体重を測定し, その後水平に寝かせて外套部を固定し, 触腕掌部中央に擬餌針の針笠をかけて, 約2.0~2.5 cm/secの速度で引っ張り, 触腕が破断した時点の荷重を記録した (Fig. 17)。なお, 調査期間中に左右の触腕は, 1日に30~50個体測定し, 触腕1本については合計1,776個体 (左885個体, 右891個体), 触腕2本については合計871個体の破断強度を測定した。

破断強度 (S) は触腕の断面積に関係し, ML の2乗に比例すると仮定して, (5) 式のように示した。

$$S \propto ML^2 \quad (5)$$

この場合BWは ML の3乗に比例するものと仮定すると,

$$BW \propto ML^3 \quad (6)$$

破断強度 (S) は次式で示される。

$$S = k \times BW^{0.67} \quad (7)$$

触腕破断はBWの重さに関連しており (Guo *et al.*, 1997), この式を適用した。

まず脱落したアカイカのBWを求めるには, サンプルリングした触腕から ML を推定し, その値を用いて甲谷ら (1997) の $BW = 4 \times 10^{-5} ML^{2.9482}$ に代入して求めた。さらに, 推定したBWの値を用いて (7) 式に代入して触腕1本と2本の場合の破断強度を求め, ML と S の関係についても検証した。

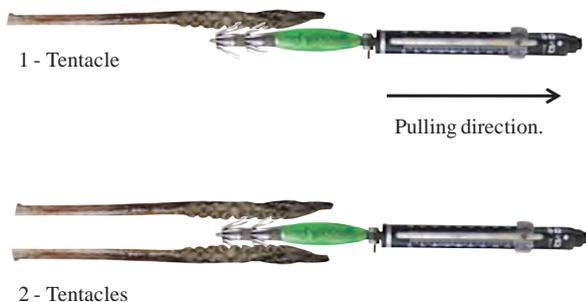


Fig. 17. The measurement of the breaking strength of tentacle (s) by fixing the mantle position and pulling with a spring-scale attached to the jig stalk until the tentacle was torn off from the base.

3.3 結果

3.3.1 釣獲と脱落状況の観察

釣獲過程における釣獲・脱落状態の観察は針掛かり状態をFig. 18の (a) 触腕, (b) 触腕以外の他腕 (1~2本), (c) 他腕の3腕以上, (d) 口器周辺の4つに分類し, その結果をFig. 19にまとめた。Fig. 19によると, 観測期間の釣獲総数は1,720個体, 脱落総数は950個体で, 総針掛かり数は2,670個体と推定され, このうち脱落率は35.6%であった。さらにこの脱落を状況別に3つに分類すると, 水中脱落は838個体 (総針掛かり数のうち31.4%), 水上脱落は71個体 (総針掛かり数のうち2.66%), 接触脱落は41個体 (総針掛かり数のうち1.54%) であった。

水中脱落は, 擬餌針の針笠に触腕が掛かって揚がってきたもので, 水上脱落と接触脱落では触腕以外の他腕での針掛かりは少なく, そのほとんどが触腕での針掛かりであった。釣獲された1,618個体のアカイカは触腕以外で針掛かりしており, 触腕での針掛かりはほとんど観察されなかった。これは, 釣獲過程で起こる水中の触腕破断が脱落の主因であることを意味する。

Table 5には, 釣獲個体の ML と TCL から推定した脱落個体の外套背長を示した。3腕以上で釣獲された個体は触腕で針掛かりした個体に比べ外套背長が有意に大きかった (Table 5; $p < 0.05$, peritzの方法)。また, 小型サイズでは触腕で擬餌針を捕捉する傾向にあった。

3.3.2 体サイズと脱落率

Fig. 20には, 釣獲個体と脱落個体の TCL の頻度分布を示した。釣獲個体, 脱落個体の TCL の値について, 式 (2) を適用して脱落率を算出した。釣獲個体の TCL は脱落個体よりも大きく, このことは小型サイズが大型サイズよりも擬餌針から脱落する傾向を示

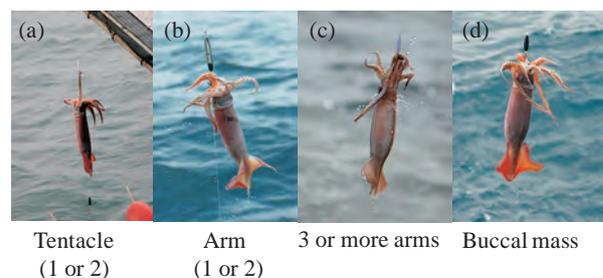


Fig. 18. Hooking patterns of different hooked position of neon flying squid.

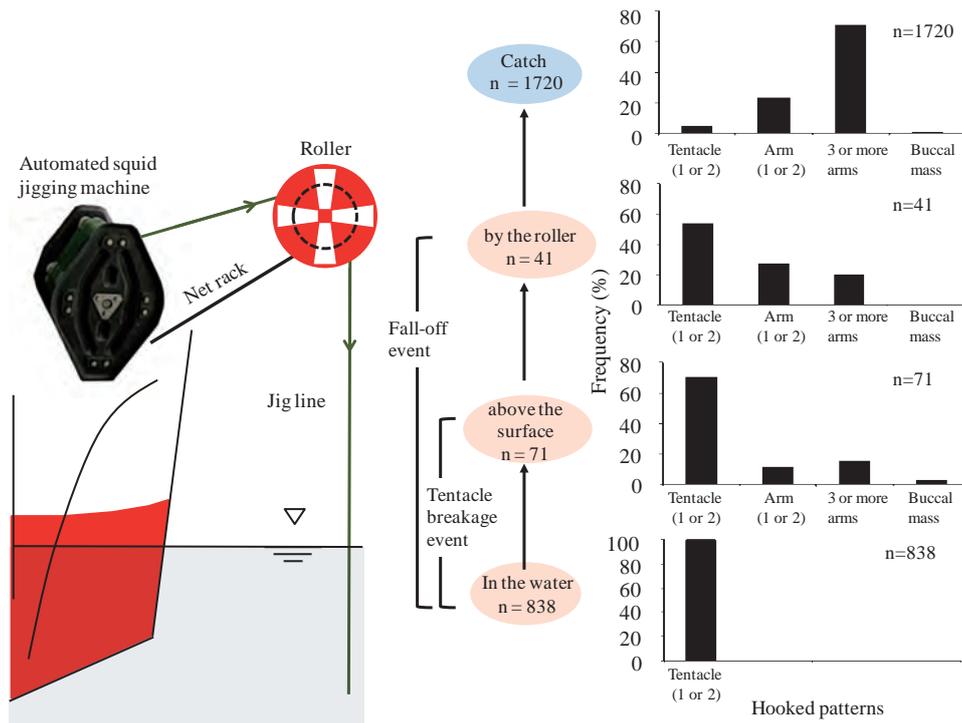


Fig. 19. Hooking patterns of neon flying squid according to the catch and fall-off events.

Table 5. Size range of captured and fallen-off squid according to the hooked patterns

Hooked pattern	Situation	Mantle Length ±SD (cm)	n
3 or more arms	Captured	36.8 ± 6.6 ^a	33
Tentacle	Captured	28.4 ± 4.4 ^b	4
Tentacle	Fell-off	28.3 ± 5.3 ^b	4

Different superscript letters indicate a significant difference (Peritz's method; p<0.05).

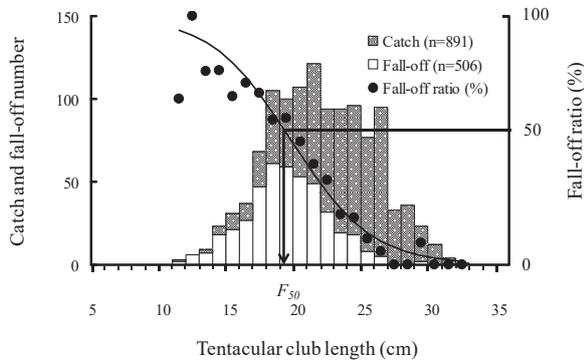


Fig. 20. The fall-off ratio according to the mantle length, indicating an F_{50} of 37.4cm.

している。TCLに応じた脱落率のロジスティック式曲線は次のように求められた。

$$p = \left\{ \frac{1}{1 + \exp((-6.517) + 0.337 \times l)} \right\} \quad (8)$$

Fig. 20に示すように、パラメータ a , β を式 (4) に代入すると F_{50} は 19.3cm となった。

釣獲個体と脱落個体の体サイズを比較するため、脱落個体の体サイズをTCLから推定した。TCLとMLの関係は釣獲個体のデータから求め (Fig. 21), 次の式で示される。

$$ML = 1.09TCL + 16.3 \quad r = 0.76 \quad (9)$$

擬餌針に針掛かりしたアカイカのうち半数が脱落するサイズは、ML37.4cmと推定された。尤度比検定の結果、フルモデルとロジスティックモデルには有意差が見られなかった ($p > 0.05$; 逸脱度=27.4, 自由度=35, $p=0.82$) ため、このロジスティックモデルは適合しているといえる。

3.3.3 触腕破断強度の測定

触腕破断強度の測定時には、触腕が引っ張られたときの破断発生位置も観察した。その結果、触腕の吸盤が分布する位置では破断することなく触腕の基部で破

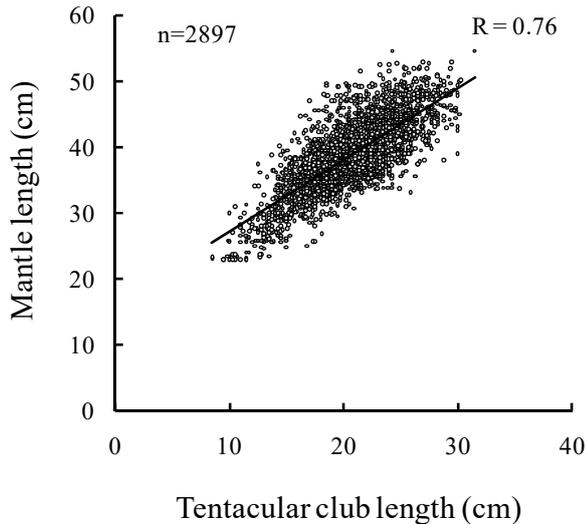


Fig. 21. The mantle length according to the tentacular club length.

断した。また、擬餌針の針笠に掛かって残っていた触腕からもほぼ同部位で発生していることが確認された。触腕破断強度は触腕1本に対して0.2~5.8kgf、触腕2本に対して0.5~9.5kgfの範囲であった。触腕破断強度とBWとの関係をFig. 22に示した。BWに対する触腕1本の破断強度の回帰分析に基づき、破断強度はほぼ自重に等しいことが確認された。式(7)をもとに適用し、触腕破断強度を求めると触腕1本の場合は $S = 1.38 \times BW^{0.67}$ ($r = 0.84$)、触腕2本の場合は $S = 2.29 \times BW^{0.67}$ ($r = 0.84$)となった。

甲谷ら(1997)の式より、MLに対するBWの曲線を導き、これとMLに対する触腕破断強度を比較してFig. 23に示した。このFig. 23より、触腕1本の場合、破断強度は $S = 1.29 \times 10^{-3} ML^{2.0}$ (kgf)、触腕2本の場合は、 $S = 1.81 \times 10^{-3} ML^{2.0}$ (kgf)であった。触腕1本の場合ML41.4cm、触腕2本の場合ML57.7cm以上になると自重が破断強度よりも重くなるため、触腕が破断しやすくなる傾向が示された。しかし、触腕1本の破断強度はML41.4cm以下でも、自重とほぼ同程度であったことから、 F_{50} よりも小型のアカイカで触腕破断の可能性が残る結果であった。

3.4 考 察

イカ釣り漁船のアカイカ釣り漁業は35°N~45°N, 170°E以東の北太平洋で操業され、5月中旬から7月下旬までML35cm以上の秋生まれ群とML35cm未満の冬春生まれ群を対象としている(Ichii *et al.*, 2004; Murata, 1990)。2007年の第二吉丸の調査操業(山下, 2008b)では、釣獲アカイカのサイズ組成の

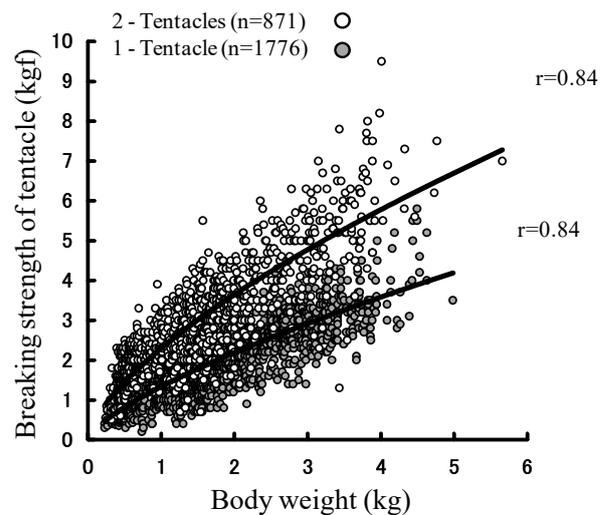


Fig. 22. The breaking strength of tentacle (s) according to body weight in air.

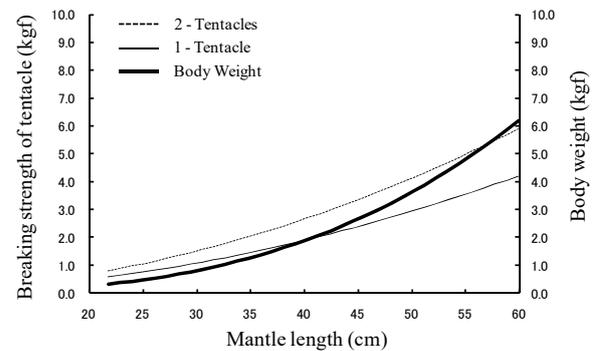


Fig. 23. A comparison of tentacle breaking strength and body weight in air according to the mantle length.

モードは5月でML36cm (26~46 cm)、6月でML36cm (21~49 cm)、7月でML38cm (24~50cm)であった。

本稿の結果では、ML37.4cmよりも小型サイズのアカイカは半数が触腕破断を起こし脱落することから、秋生まれ群の脱落率を低減することが本漁業にとって重要であることを示している。

触腕破断は水上やガイドローラーの位置でも起こるが、その主たるものは水中で起こっていた。触腕の破断強度は体サイズと関係があり、大型サイズほど強度が大きく、触腕1本でML41.4cm以上、触腕2本でML57.7cm以上の体重は触腕の破断強度を上回ることがわかった。一方で、Table 5に示すように、触腕による針掛かりでなく、3腕以上で針掛かりした大型サイズの場合には脱落せずに、高い釣獲割合を示している。Chen (1996), Chen *et al.* (2008) は、アカイカ

の触腕以外の他腕の破断強度は触腕の2～3倍あることを報告しており、触腕以外の他腕で針掛かりした場合に釣獲割合が高いという今回の結果と一致する。釣具ラインの巻上げ過程における触腕破断は、上昇する釣具の動きに対して針掛かりしたアカイカが逃避行動を起こす動的な動きによって生じる可能性が高い。本研究における触腕破断強度の測定は、静的負荷の増大によるもので、逃避行動のような活発な動きは再現しておらず、おそらく触腕に対する破断荷重としては過小評価していることが考えられる。釣獲過程における水中の触腕破断は、おもに上昇する釣具の動きとイカの漏斗からの海水吐出推進力をとまなう逃避行動(Thompson and Kier, 2002)で、触腕が引っ張られて極端に伸長することによって起こるものと推測される。

この結果は触腕で針掛かりしたアカイカが水中でほとんど脱落し、反対に接触脱落や水上脱落の観察数が少ないことと対応している。アカイカは針掛かり後の逃避行動の際に、外套膜を収縮させた吐出推進力によって、触腕破断の可能性を高くしていることも考えられる。

Kier and van Leeuwen (1997) は、アメリカケンサキイカ *Loligo pealei* が餌生物を捕捉する際の触腕の動きについてハイスピードカメラによって解析し、触腕を繰出した際に吸盤を使ったか、掌部が餌生物と接触した際に触腕を繰出したかを調べた。さらに、Kier *et al.* (1997) はアメリカケンサキイカが餌生物を捕捉したときの一連の動きも観察した。その結果、触腕が餌生物を捕捉するときのみに使用されることを特定した。また、本種はまず触腕で餌生物を捕捉し、その後触腕以外の他腕で抱え込むことを確認し、この一連の動きが釣具ラインの巻上げ過程で行われることを確認した。

前述でも示したように、釣具ラインの巻上げ過程で針掛かりしたイカは擬餌針を触腕捕捉した後に、異変を察知して逃避行動をとる。大型になるアカイカの場合、針笠に触腕が掛かった状態が観察されているので、巻上げ過程までのイカ自体の流体抵抗が大きく、これに逃避行動が加わることで触腕破断の原因となると推測される。

Fig. 20の釣獲個体と脱落個体の体サイズの関係から、小型サイズのアカイカほど触腕の破断強度 (Fig. 21) は小さくなり、触腕破断を起こして脱落する傾向にあることを示している。他方、Fig. 22のBWと触腕破断強度の比較は、MLに基づいており、触腕1本で擬餌針に掛かった場合、ML41.4cm以上のときに空中で自重を支えることができず、またこれ以下の小

型サイズの場合でも触腕破断強度はBWとほぼ同程度であり、触腕破断の可能性は残る。軟体類は防御メカニズムとして触腕あるいは1腕以上を自切することがある。同様に甲殻類の爪や爬虫類の尾も自切することが知られている (Fleming *et al.*, 2007)。また、アマダコ *Ocythoe tuberculata* は交接の際にオスの交接腕の先端を自切して、メスの体内に残存し、栓のような役割を持つものがある (Okutani, 1990)。釣具ラインの巻上げ過程におけるアカイカの触腕破断は、機械的に引っ張られた切断であり、自切とは異なるものである。しかし、この破断は触腕が切断されることで、より致命的な状況から逃れるための防御戦略として効果的に働いていることが考えられる。触腕破断による獲り逃がしを最小限にするための方策は、触腕ではなく他腕による針掛かりの頻度を高めることにある。

Table 5に示したように、触腕以外の他腕で針掛かりした釣獲個体は触腕で針掛かりした釣獲個体及び脱落個体よりも大型であった。この結果は、イカはまず触腕で餌生物を捕捉し、その後触腕以外の他腕で餌生物を抱え込む (Kier and Leeuwen, 1997) ときの捕捉行動と関連するものと考えられる。漏斗からの強い海水吐出推進力で触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込んだアカイカは、触腕破断の可能性が軽減する。このことから吐出推進力、すなわち遊泳能力が釣獲にむすびつく重要な手掛かりとなる。大型サイズはこの推進力が大きいと、上昇する釣具ラインの擬餌針を触腕で捕捉した後に、触腕以外の他腕で抱え込むものと考えられる (Bartol *et al.*, 2001a; Bartol *et al.*, 2001b; Webber and O' Dor, 1986)。

触腕破断が引き起こす獲り逃がしを最小化するためには、他腕によって擬餌針捕捉をさせることが重要であると示唆された。このことについて水産庁の調査報告 (水産庁, 1996) では釣機の位置によって脱落率が異なり、それが海況の影響を受けた船体運動によるものであると報告している。次章ではこの結果の再現性を確認するとともに、もう一つのアプローチとして、イカ釣機の巻上げ回転数を制御することで他腕の針掛かりを増やす方法について検討する。

第IV章 アカイカ釣りにおける釣り落としと船体運動との関係

4.1 緒言

第III章では脱落現象の発生要因である触腕破断の機構を解明した。脱落現象の発生要因については、水産庁の調査 (水産庁, 1996) により、風と荒天で脱落率

の傾向が異なり、ビューフォート風力階級に基づく風力5、風浪階級4以上の荒天の場合に船首船尾の釣機で脱落率が高かったことから、船体運動との関係が示唆されている。しかし、その観察回数は少なく、再現性も確認されていない。

本研究は、船体運動が脱落に及ぼす影響について、より具体的に把握するため、船体運動の指標として、ピッチングの影響を受けると考えられる釣機の位置に加えて、ローリングの影響を受けると考えられる受け台の長短に着目し、ロジスティック回帰分析を行った。

4.2 材料と方法

2003～2005年に、(独)水産総合研究センター開発調査部(現開発調査センター)が実施した、イカ釣り調査(牟田ら, 2005; 山下, 2005; 黒坂, 2005)において、アカイカの脱落現象に関する情報を収集した。調査には大型いか釣り漁船第八白嶺丸(276GT, 56mLOA)を使用した。一般に大・中型イカ釣り漁船は、両舷の船首から船尾にかけて自動イカ釣機を配置し、それぞれの釣機の下にはナガシと呼ばれる受け台を舷外に向けて設置している。釣糸は、受け台先端のガイドローラーを経由して海中に降ろされる。自動イカ釣機MY-10(東和電機製作所)を船首から船尾にかけて順に1～22号機として設置した。第八白嶺丸の釣機の配置をFig. 24に示した。

左舷側の4号機的位置には釣機の代わりに観測機器用のラインホーラーを設置したため、釣機台数は右舷22台、左舷21台であった。ロジスティック回帰分析に当たっては、隣接する釣機2台をまとめて1水準として取り扱い、船首から船尾にかけて釣機群I(1, 2号機)からXI(21, 22号機)までの計11水準と定義した。また、2005年の調査においては7号機と9号機は、別途脱落防止仕様針の実験を実施したため(黒坂, 2005)、除外した。受け台は長短2種類を使用し、奇数号機には短い受け台、偶数号機には長い受け台を設置した。受け台の長さは、長い受け台が4.50m(22号機のみ3.36m)、短い受け台が1.83mであった。釣機に設置する釣具は道糸ワイヤー(φ1.6mm)の下にテグスを連結させ、ジャンボ6型釣針(針径1.6mm 6本立て×2段)を1m間隔で15個付け(テグスの構成は上から擬餌針6本は120号、中間の擬餌針6本は100号、下の擬餌針3本は80号、最下針と錘の間は50号のテグスを約3.75m)、その下に鉄製600匁(2.25kg)の錘を取り付けた。釣具は、各釣機の両側に付属する巻取りドラムのうち船首側のみに取り付けた。

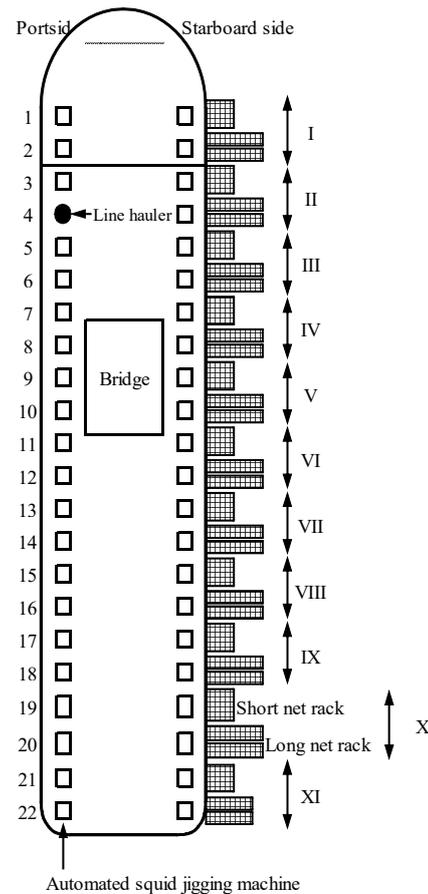


Fig. 24. Allocation of the automated squid jigging machines and the net rack on the jigging vessel, Hakurei Maru No.8. Arabic numerals indicate identification numbers of the jigging machines. Roman numerals show the machine groups as the levels of explanatory variables of the machine positions.

4.2.1 船体位置による釣獲・脱落状況の観測

それぞれの釣機において、釣獲したイカと脱落したイカの数に計数した。観測は1回約2時間で、主たる時間帯を、過去の調査結果(水産庁, 1996; 小河, 2002; 小河, 2003; 宮川, 2004)から最も釣獲が多いと判断される日没前後とし、夜間にも適宜行った。脱落個体は、水面上で脱落する様子を目視確認した個体および、触腕が針に残った個体とした。針に残った触腕が水面に達する前に外れることも起こり得るが、これは確認する方法がなく、ここでは無視した。また、当観測時のビューフォート風力階級(以下、風力という)を記録した。

4.2.2 脱落率と船体運動

当該結果の統計学的有意性を検討するため、針に掛かったイカが釣獲されるか脱落するかを二項分布と仮定して、ロジスティック回帰分析を行った。説明変数は、釣機群、即ち釣機の船首船尾間の設置位置（以下、位置）、受け台の長短、舷の左右（舷）、調査年（年）、風力によって区分した風と荒天（風力）の5因子とした。すべての説明変数は、質的変数として、各水準が0または1をとるダミー変数（Dobson, 1993）を用い、第1番目の水準を規準とした。即ち、第1番目の水準のダミー変数は常に0、その他の水準では、該当する水準のダミーを1、それ以外の水準のダミーを0として、各係数を推定した。従属変数は釣獲を1、脱落を0とした。各説明変数を含むモデルと含まないモデルを仮定し、赤池の情報量規準（AIC）を用いて最適モデルを選択した。

釣獲率（釣獲個体数/釣獲個体数+脱落個体数） p は次のモデルで表される。

$$p = \left\{ \frac{1}{1 + \exp[-(\lambda)]} \right\} \quad (10)$$

$$\lambda = a + a + \beta + \gamma + \delta + \varepsilon \quad (11)$$

ここで、 λ は p のロジットで、 a 、 β 、 γ 、 δ 、 ε はそれぞれ位置、受け台、舷、年、風力の効果を、 a は切片を表す。調査年 y の風力 w の時に舷 s 、位置 m 、受け台 c の釣機から投入された針を捕捉した n 個体のイカのうち、 j 個体が釣獲され、 $n-j$ 個体が脱落したときの最大対数尤度（ MLL ）は、次式で示される。

$$MLL = \sum_y \sum_w \sum_s \sum_m \sum_c \{ \ln(n!) - \ln(j!) - \ln[(n-j)!] + j \ln(p) + (n-j) \ln(1-p) \} \quad (12)$$

次式（13）の赤池の情報量基準（AIC）によりモデル選択を行った。

$$AIC = -2MLL + 2k \quad (13)$$

ここで、 MLL は（12）式で得られる最大対数尤度、 k は自由パラメータ数である。

4.3 結果

4.3.1 船体位置による釣獲・脱落状況の観測

2003、2004、2005年の釣獲と脱落の合計観測個体数はそれぞれ2,328、6,852、3,012個体であった。水産庁の調査（水産庁、1996）で釣機位置による脱落率の

差異が認められた風力5を規準として、それ以上を荒天、風力4以下を風とし、年、釣機群、受け台長短毎の脱落率を、風と荒天の海況別にFig. 25に示した。風と荒天で観測した個体数はそれぞれ11,159個体と1,033個体であった。風では、釣機群は船体中央付近で脱落率が高く、船首船尾側ほど低かった。受け台は長い方が脱落率は低かった。荒天では風ほど明瞭な傾向は見られずバラツキが多かった。

4.3.2 脱落率と船体運動

各モデルのAICをTable 6に、選択されたモデルの係数パラメータ推定値をTable 7にそれぞれ示した。AICにより最適と判断されたのは、釣機位置、受け台、年、風力の効果を含み、舷の効果を含まないモデルであった。選択されたモデルの、釣機位置の係数推定値は、Vの係数が最も小さく、XIを除き船首船尾ほど大きな値を示しており、船首船尾ほど脱落が少なかった。受け台に関しては、長い方の係数が正の値を示し、短い受け台に比べて長い受け台で脱落が少なかった。年については、年々大きな値となり、脱落が少なくなる傾向が見られた。風力は、風に比べて荒天で負の値を示し脱落が多かった。

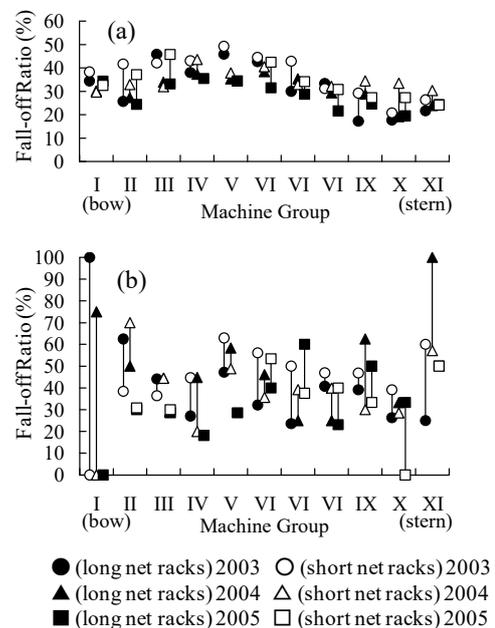


Fig. 25. The fall-off ratio of squid by the length class of the net rack and the machine group in each year. The fall-off ratio shows the percentage of the number of fall-offs to the total number of catches and fall-offs. (a) Wind scale of 4 or less (b) Wind scale of 5 or more.

4.4 考 察

上述の通り、釣機の位置が船首船尾に近いほど、即ちピッチングの影響が相対的に大きい位置ほど、風の状態では脱落が有意に少なくなることが示唆された。また、受け台が長く、釣具の投入位置が舷側から張出して船体の中央から離れるほど、即ちローリングの影響が相対的に大きい位置ほど、脱落が有意に少なくなることが示唆された。

イカが触腕のみで擬餌針を捕捉した場合には、船体

Table 6. AIC values for models of explaining the fall-off from jigs. The models were selected by using the backward step-wise selection method.

Deleted variable	AIC
none (full model)	15421
side (port or starboard)	15420*
year	15430
cradle	15447
wind	15428
position	15522
none(model without side)	15420*
year	15429
cradle	15445
wind	15427
position	15520

*: selected model

Table 7. The estimated parameters of the selected model of explaining the squid fall-off from jigs

Explanatory variable	Estimated parameter (SE)
intercept	0.566** (0.088)
position (relative to I)	
II	-0.071 (0.103)
III	-0.252** (0.094)
IV	-0.336** (0.093)
V	-0.374** (0.094)
VI	-0.370** (0.099)
VII	-0.133 (0.094)
VIII	0.031 (0.095)
IX	0.057 (0.099)
X	0.293** (0.105)
XI	0.205* (0.103)
net rack (relative to short)	
long	0.205** (0.039)
year (relative to 2003)	
2004	0.152** (0.053)
2005	0.215** (0.061)
wind scale (relative to 0 - 4)	
5 - 7	-0.214** (0.071)

**p<0.01, *p<0.05

運動が激しい方が触腕の切断による脱落が起こり易いものと考えられる。船体運動が相対的に大きい位置の脱落率が相対的に低くなるという今回の結果は、脱落の発生はアカイカによる擬餌針の捕捉行動に大きく依存し、触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込んだ個体の脱落は、触腕のみで擬餌針を捕捉した個体に比べて低減される可能性、および、釣具が大きく運動することにより、触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込む行動が促される可能性を示唆している。

窪寺 (2004) は、水中カメラを用いたアカイカの摂餌行動の観察結果から、本種が、大型で活発な餌を捕らえる場合には、全腕を広げて前進し餌を抱き込むように捕獲する行動をとることを確認し、小型で遊泳力の低い餌生物と大型で活発な餌生物とでは、その捕獲方法が異なる可能性を報告している。釣具の運動が触腕以外の他腕で抱え込む行動を促すという前述の仮説は、この報告と一致するものと推察される。

他方、荒天の場合には風の時にみられた様な明瞭な傾向はなく、船首船尾では脱落率が極端に高まる場合があった (Fig. 25)。水産庁の調査 (水産庁, 1996) でも荒天のときには船首船尾で脱落率が高い傾向が見られた。これらのことから、風の海況では船首船尾や長い受け台の釣機で脱落率は低減されるが、荒天により運動が過大になると脱落が多くなるものと考えられる。このことの解明には、船体および釣具の運動を計測し、これと脱落との関係を把握するとともに、釣機の位置、受け台、海況などの諸要因が釣具の運動に及ぼす影響を明らかにする必要がある。この現象を解明するため、次章では加速度ロガーを使用して船体および釣具の運動を計測し、船体の運動が釣具に伝搬されているのかの検証を行った。

第V章 アカイカ釣り操業における釣具ラインの運動と船体運動検出の試み

5.1 緒 言

第IV章では脱落の発生要因を解明するにあたり、船上のイカ釣機の位置や天候の違いによって脱落率が異なることを報告しており、特に荒天時には、船体の運動が大きくなることで脱落が頻発するものと推察している。つまり、山下ら (2008) の推測では、荒天により大きくなった船体の運動が擬餌針に伝搬し、このことが脱落を招く原因の一つとなっていると考えられている。しかしながら、船体の運動が実際に釣具へ伝搬されているかの検証はこれまでになされていない。そこで本研究では、この現象を解明するため、加速度ロ

ガーを使用して船体および釣具の運動を計測し、船体の運動が釣具に伝搬されているのかの検証を行った。

5.2 材料と方法

調査は2007年8月18日に、北太平洋西部海域(45°N, 173°W)で第八白嶺丸(276GT, 56mLOA)にて実施した。右舷側の船首(2号機, 3号機), 中央(10号機, 11号機), 船尾部(19号機, 20号機)の釣機(Fig. 26)から舷外に張り出した受け台先端のガイドローラー側面(船体)およびワイヤーとナイロン製の道糸の連結部(釣具)に、加速度データロガー(M380L-D 2GT, Little Leonard Co. Ltd., Tokyo, Japan, 以下、加速度ロガー)を装着した(Fig. 27a)。加速度ロガーは、2軸方向(長軸方向と短軸方向)の加速度を測定して記録することが可能である。釣具に取付けた加速度ロガーは、長軸方向が釣具ラインと並行になるように装着した。一方、船体に取付けた加速度ロガーは、静止時の船体に対して長軸方向が鉛直方向と一致するように装着した(Fig. 27b)。一般的にアカイカ釣り操業では、釣具ラインが八角ドラムから毎分70回転で繰出され、毎分65回転で巻上げられる仕様である。本研究では、操業の妨げにならないように釣獲がない時間帯(19:00~20:00)に測定した解析には釣具が設定水深150mから水面まで巻上げられるときの長軸方向の加速度記録のみを用いた。なお、設定水深は魚探に映るアカイカ群の釣獲層に釣具が到達するようにイカ釣機の深度を調整した。船体および釣具ラインにて記録される加速度信号の特性を調べるために、高速フーリエ変換(FFT)によるパワースペクトル密度(PSD)の計算を行った。PSDの計算には、IGOR PRO ver 6.12(Wave Metric, Inc., Lake Oswego, OR, USA)のPower Spectral Density 関数

を用いた。

5.3 結果

船体および釣具の加速度記録(Fig. 28)から計算されたPSDの結果をFig. 29に示した。長軸方向の加速度変化は、船首で船体が $-0.18\sim 0.33\text{m/s}^2$ 、釣具が $-0.27\sim 0.35\text{m/s}^2$ 、中央で船体が $-0.12\sim 0.31\text{m/s}^2$ 、釣具が $-0.17\sim 0.33\text{m/s}^2$ 、船尾で船体が $-0.16\sim 0.22\text{m/s}^2$ 、釣具が $-0.27\sim 0.39\text{m/s}^2$ の範囲にあり、それぞれの位置で加速度はほぼ同調していることが明らかとなった。次にPSDを見ると、船体では船首部で0.156Hz, 中央部および船尾部で0.125Hzの卓越周波数が検出された。他方、釣具は2峰型の周波数が検出され、船首部で0.156Hzと2.031Hz, 中央部と船尾部はともに0.125Hzと2.063Hzが検出された。第八白嶺丸の完成図書には横揺れの周期が0.125~0.09Hzと明記されており、船体の固有周期であることがわかった。また、釣具からも同様の周波数が検出されたことから、船体の振動すなわち船体運動が釣具に伝搬していることが明らかとなった。一方で釣具のみ約2Hzの周波数が出現した。これは毎分65回転のイカ釣機ドラムの周波数1.08Hzの約2倍の値であり、ドラムの形状の影響が釣具ラインに伝搬した可能性が考えられる。

5.4 考察

山下ら(2008)の報告によると、荒天時では船首と船尾で脱落率が極端に高まる場合もあったことから、船体の運動の影響がアカイカの脱落を誘発すると考えられる。Kurosaka *et al.* (2012)はアカイカの捕捉行動について、触腕で擬餌針を捕捉した後に触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込むと推察している。この船体

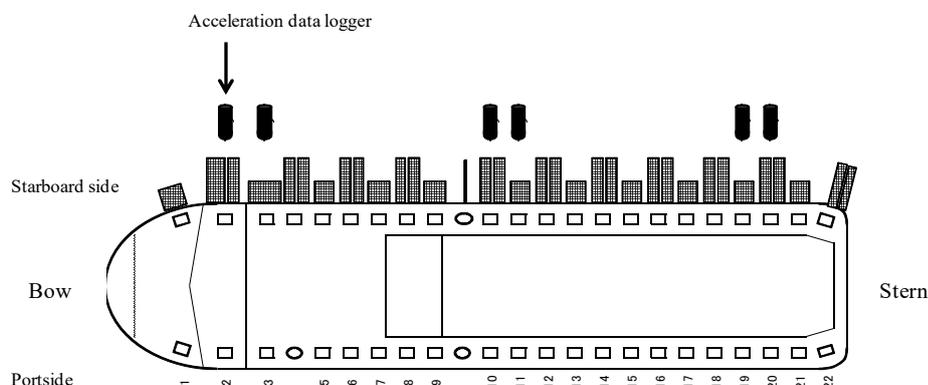


Fig. 26. Positions of the attachment of acceleration data-logger on the jigging vessel, Hakurei Maru No.8.

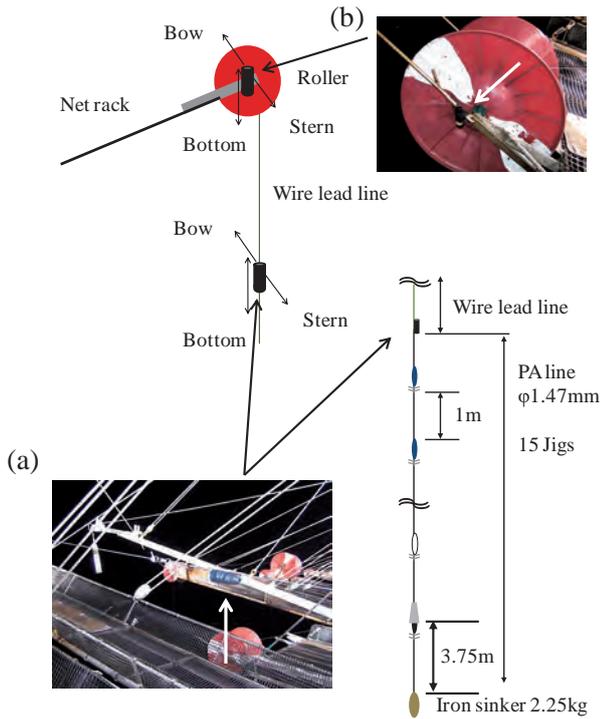


Fig. 27. Schematic diagram showing the attachment of acceleration data-logger to the wire line (a) and roller (b).

の運動はある閾値を超えることによって、伝搬した釣具ラインの上昇速度を速めることが考えられる。つまり、荒天時の船体運動が擬餌針に伝搬した場合、アカイカが擬餌針を捕捉しようと追いついても、瞬間的な釣具ラインの上昇速度によって触腕を伸ばしての捕捉しかできず、結果として巻上げ過程で触腕の破断が起こりやすくなったと考えられる。

一方で、山下ら (2008) は、ビューフォート風力階級に基づく風力4以下の風時では、船体中央部の脱落が有意に高くなる傾向にあると報告している。船にはビルジキールという、横揺防止板が船体中央部の船底湾曲部両舷に付いており、横揺時にこの板の周りに渦が発生する (池田ら, 1977)。この渦抵抗によって横揺減衰を大きくし、揺れが収まるようにしている (池田, 2006; 池田, 2009)。つまり、船体中央部では横揺時に、意図的に渦が発生するように流れ場が設計されており、この流れ場は船首船尾に比べて乱れが大きい。このため、流れ場では海底方向に強い流れが発生し、触腕で針掛かりした個体は脱落が起こりやすと考えられる。また、ピッチング (横揺) やローリング (縦揺) の影響が相対的に大きい釣具ほど脱落が有意に少なくなる傾向があり、これはアカイカの捕捉

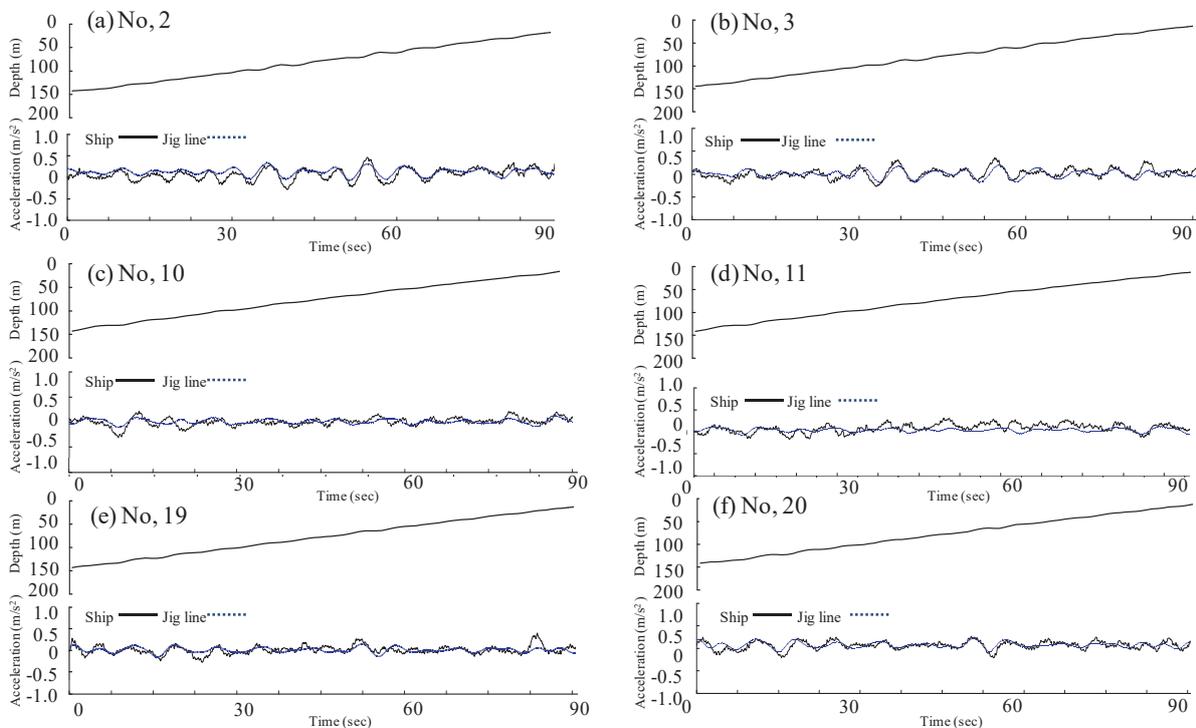


Fig. 28. Time series data of depth and acceleration obtained from No 2 (a), 3 (b), 10 (c), 11 (d), 19 (e) and 20 (f), respectively. Solid line and dotted line indicate acceleration data obtained from jig line and ship, respectively.

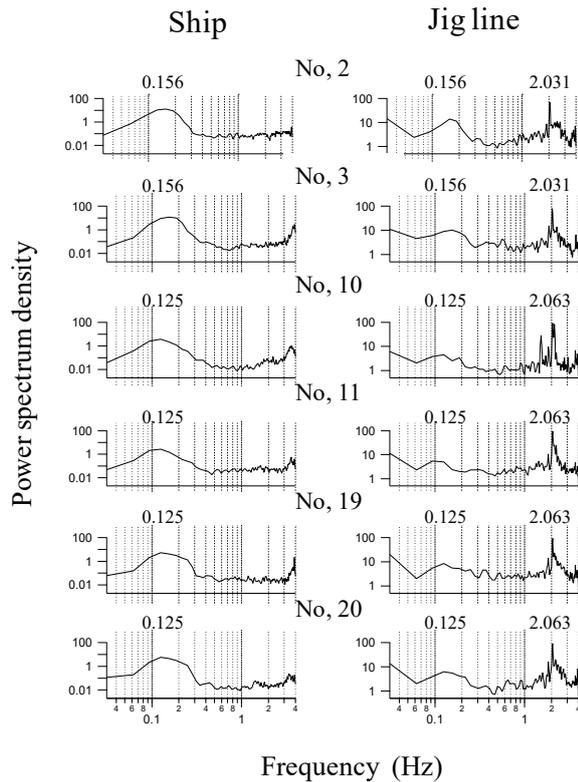


Fig. 29. Power spectrum density according to the frequency.

行動に依存するものと推察している（山下ら，2008）。今回の結果より，船体の運動が海中の釣具に伝搬していることが明らかになった。天下井（2001）はある周波数の波に対してトロール等の漁具の同調現象が起こるとしており，船体の運動がアカイカの捕捉行動を誘発する可能性も示唆された。

今回の結果から，荒天時のときに脱落率が高くなる原因は船体の運動が起因していることが明らかとなった。一方で風のときに船体中央部で脱落が高くなるのは渦抵抗による流れ場の乱れが原因である可能性が考えられる。次章では脱落を低減するため，釣具ラインの上昇速度に着目し，アカイカの擬餌針捕捉行動に及ぼす影響について分析した。

第Ⅵ章 自動イカ釣機の釣具ライン上昇速度がアカイカの擬餌針捕捉行動に及ぼす影響

6.1 緒言

第Ⅴ章では針掛かり後の取り逃がしについて，天候による船体運動の観点から検討を加え，ビューフォートの風力階級4以下の比較的風の場合には，釣機が船首

船尾に近いほど脱落が少なく，釣機に付属する受け台については短い受け台に比べ長い方の脱落が少なかったことを明らかにした。しかしながら，釣具の運動に関する定量的な知見はほとんどないので，船体および擬餌針の動きを計測し，これと脱落との関係を把握する必要がある。

近年，水生動物の行動研究に装着型の加速度ロガーが使われている（Kawabe *et al.*, 2003）。この加速度ロガーには，装着した水生動物が経験した水温，水深に加えて，行動として2軸方向の加速度が記録される。対象生物の野外における行動を，加速度ロガーを用いて計測することにより，ウェッデルアザラシ *Leptonychotes weddellii* では肥満度に応じて泳法を使い分けることが明らかにされた（Sato *et al.*, 2003）。また，魚類では河川の増・濁水状態が雌ザケ *Oncorhynchus keta* の産卵行動に影響を与えていることが明らかにされ（Tsuda *et al.*, 2006），従来の調査手法では明らかにできなかった生態や行動の特性が解明されつつある（Kawabe *et al.*, 2003；Akamatsu *et al.*, 2005）。この手法は生物のみならず釣具の運動計測にも応用できるものと考え，本研究では，加速度ロガーを用いて擬餌針の繰出し・巻上げ過程における加速度を測定し，擬餌針（台和漁具社製，ジャンボ6型釣針）の動きとアカイカの針掛かり状態との関係について調べた。

6.2 材料と方法

6.2.1 加速度ロガーによる釣具ライン上昇速度の計測

調査は2006年6月6日～9月30日に，北太平洋中・西部海域（40°～46°N, 150°E～170°W）において第八白嶺丸（276GT, 56mLOA）で実施した。この船の船首部，中央部，船尾部の所定の自動イカ釣機（株式会社 東和電気製作所製，MY-10）の釣具ラインのワイヤーとナイロン製の道糸との連結部に，加速度ロガー（M380L-D 2GT, Little Leonard Co. Ltd., Tokyo, Japan）を取り付けた。釣具ラインの仕様は，20mのナイロン道糸の先に擬餌針を1m間隔で15個取り付け，その下端には600匁（2.25kg）の鉄錘を取り付けたものである。加速度ロガーによる計測は，日没30分後から日出までの間でアカイカのまとまった釣獲が得られ次第，約2時間連続して行った。アカイカが擬餌針を捕捉する瞬間は以下の方法で特定した。まず，釣機の集中制御盤に示された値が基準値6kgfを超える急激な負荷の上昇を検知したときの捕捉時刻と深度値を記録した。次に，アカイカの擬餌針捕捉から釣機の

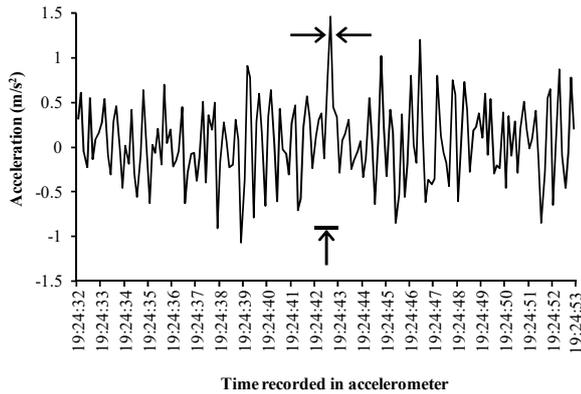


Fig. 30. An example of the recorded variation in acceleration by a squid being hooked during winding the jig-line. A peak between horizontal arrows shows the maximum positive acceleration when a squid held the jig. An upward arrow shows the time of detecting the load on the control panel of the automatic squid jigger, which is close to the time of maximum acceleration recorded on the jig line. Note that the local peaks of acceleration around the time of seizing (or grasping, attacking) the jig could show incomplete hooking of a squid. Fluctuation of the recorded acceleration was caused by the pitch and roll of the ship.

負荷表示までの糸の伸びなどによる計時誤差を考慮して、Fig. 30に例示したように、負荷上昇時刻の前後10秒間の加速度データを解析に用いた。あらかじめ同期をとってある加速度ロガーのデータのうち、この時間内で加速度が正方向に最大の値をとった時刻をアカイカが擬餌針を捕捉した瞬間とした。

加速度変化はデータロガーのY軸加速度を使用し、正方向を下向きの海底方向とした。すなわち、正の最大値が計測された時刻は、釣具ラインが捕捉により下に引っ張られた時刻である。計測された加速度には船体運動のほかに、ドラムのノイズや水中の流体抵抗などの不十分な針掛かりによる正の加速度の極大値も含まれている。このため捕捉時刻前後にいくつかのスパイク状の加速度ピークが計測されることがあった (Fig. 30)。捕捉時刻は、加速度の基準閾値を具体的な値として設定することは困難であったため、上述のように、集中制御盤による針掛かり検出で時刻の絞り込みを行ったのちに、正（すなわち下方向）の最大加速度と定義した。この時点で加速度ロガーに記録された捕捉時刻と深度値の連続する2データ間の深度差から、擬餌針を捕捉する1秒前の釣具ラインの上昇速度を求めた。なお、水深データのサンプリング間隔は1 Hzとし、上昇速度を秒速で求めた。

6.2.2 針掛かりしたアカイカの観察

加速度ロガーによる計測と同時に、擬餌針に掛ったアカイカが釣機の巻上げ過程で水面から上がり、釣機から舷外に張り出した受け台先端のローラー（前車）に接触するまでの脱落状態について観察した。擬餌針に触腕だけが掛かって残っている脱落状態を「水中脱落」、巻上げ中に水面上で脱落したものを「水上脱落」、前車に接触した時に脱落したものを「接触脱落」とする分類は3章と同様である。釣獲個体と水上および接触による脱落個体は、針に掛かった腕の種類とその本数を目視とビデオで観測し、触腕1本の針掛かり、触腕2本の針掛かり、触腕以外の他腕1本による針掛かり、触腕以外の他腕2本による針掛かり、触腕と他腕を含め3腕以上の針掛かり、口器周辺での針掛かりの6つに分類した。水中脱落個体は水中で触腕が切断し、触腕（1本あるいは2本）だけが擬餌針に掛かってくるため、触腕1本あるいは2本で擬餌針を捕捉したものとして扱った。

6.3 結果

釣機の負荷が上昇した時刻と深度とを加速度ロガーのデータと対応して、加速度の変化から擬餌針を捕捉したと判断された5個体について針に掛かる1秒前の釣具ラインの上昇速度をTable 8に示した。

触腕以外の他腕で針掛りした3個体が擬餌針を捕捉する1秒前における釣具ラインの上昇速度は、1.6m/s、1.5m/s、1.4m/sであった。触腕のみで針掛かりし、脱落した2個体の釣具ラインの上昇速度は、2.5m/s、2.7m/sであった。これらの結果から、アカイカが擬餌針を触腕で捕捉するか触腕以外の他腕で抱え込むかの釣具ラインの上昇速度には、閾値が存在するものと推察された。

6.4 考察

近縁種であるスルメイカ *Todarodes pacificus* の観察では、餌生物の動きが遅いとき、あるいは停止しているときは触腕の代わりに触腕以外の他腕で餌生物を抱え込むことが報告されている (Flores, 1983)。一方、カナダマツイカ *Illex illecebrosus* は大きく速い餌生物に対し、触腕よりも触腕以外の他腕で捕捉する観察例も報告されているが (Foyle and O'Dor, 1987)、水槽における摂餌行動の観察から、死亡したカラフトシシャモ *Mallotus villosus* をモノフィラメント製のナイロンで吊るしたときには触腕以外の他腕で抱え込むこ

とが報告されている (Bradbury and Aldrich, 1969)。これらの現象を考慮すると、アカイカは釣具ラインの上昇速度が遅いときは触腕以外の他腕によって擬餌針を抱え込みし、上昇速度が速いときは触腕のみで擬餌針を捕捉するものと推察された。

次章では、アカイカが触腕のみで擬餌針を捕捉する時と触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込む時の釣具ラインの上昇速度の範囲を推定することにより、触腕以外の他腕での針掛かりを促進して、脱落率を低減する巻上げ回転数を検討した。

第七章 アカイカ釣り漁業における釣具巻上げ回転数制御による脱落率低減

7.1 緒言

第VI章では、本種が擬餌針を捕捉する直前の巻上げ回転数と捕捉行動との関係を調べた。その結果、釣具ラインの上昇速度が2.5m/s程度の速度では触腕のみで、1.5m/s前後では触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込む傾向を確認している。これらの現象より、アカイカが擬餌針を捕捉する際に、触腕か、それとも触腕以外の他腕を使うかは、釣具ラインの上昇速度による閾値が存在するものと考えられる。そこで本研究では、加速度ロガーを使用してアカイカが擬餌針を捕捉する際の釣具ラインの上昇速度と捕捉行動との関係を解析し、触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込む釣具ラインの上昇速度をロジスティック式により推定した。さらに、この結果が釣獲向上につながるかを検証するため、釣機ドラムの巻上げ回転数を変化させて操業試験を行った。

7.2 材料と方法

調査は2007年6～9月に、中部北太平洋海域 (Lat. 35°～45° N, Long.170° E～170° W) において、(独)水

産総合研究センターが用船した第八白嶺丸 (276GT) で実施した。漁獲物は、170°以東に分布する外套背長 (ML) 35cm以上のメス主体の秋生まれ群を対象とし (Ichii *et al.*, 2004; Murata, 1990), ML 35cm以上を大型サイズ, ML 35cm未満を小型サイズとした。

7.2.1 巻上げ回転数の最適化試験

第八白嶺丸ではイカ釣機 (株式会社東和電気製作所製, MY-10) を右舷に21機, 左舷に22機を備えている (Fig. 31)。巻上げ回転数の最適化試験は、ビューフォート風力階級4以下の平穏な海況で行い、この条件で脱落率が低いとされる長い受け台 (山下ら, 2008) が装備されているイカ釣機を対象とし、右舷側の4号機, 8号機, 10号機, 14号機, 16号機, 20号機を使用した。各釣機には、15個の擬餌針を取付けた釣具ラインを繰り出し・巻上げるための八角ドラムが両舷に2個ずつ備わっている。2008年6月3日～7月12日にかけて、巻上げ回転数としては通常用いられる毎分65回転を中心に50回転から80回転を6台のイカ釣機に設定し (Table 9), 回転数の異なるイカ釣機毎に、釣獲した個体と脱落した個体を計数し、CPUEを求めた。観測は1日1回, 約1時間で、過去の調査結果から最も釣獲が多いと判断される日没前後を主体に行った。漁獲物に関しては、6種類の巻上げ回転数によってそれぞれ釣獲されたアカイカを集めて、釣獲開始から順次100個体採集し、MLを測定した。操業に際しては、イカ釣機の釣具ラインがお互いに絡まるのを防ぐため、2個備わっている八角ドラムのうち、船首側の八角ドラム一機のみ使用し、全釣機の繰り出し回転数を毎分70回転とし、釣具の到達水深を150mとした。

巻上げが速いイカ釣機は、巻上げ完了後も他の遅いイカ釣機の巻上げが完了するまで待機し、全てのイカ釣機が巻上げを完了してから同時に繰り出しを開始させる同期設定とした (MY-10 集中制御盤 取扱説明書 ver 2.0, 株式会社 東和電機製作所)。この同期設定の

Table 8. Capture situation and upward jig speed immediately before hooked

Date	Aug. 8, 2006	Sep. 8, 2006	Sep. 8, 2006	Sep. 8, 2006	Sep. 8, 2006
Beaufort scale	5	1	1	1	1
Position of the automated squid jigging machine	Midship	Midship	Midship	Midship	Stern
Caught or fall-off	Caught	Fall-off in the water	Caught	Caught	Fall-off in the water
Hooked pattern	Three arms or more	Tentacles	Two arms	Two arms	Tentacles
Hooked depth (m)	155	140	140	145	90
Hooked time (h:m:s)	20:42:45	19:24:42	20:03:20	20:10:50	19:28:25
upward jig speed immediately before hooked (m/s)	1.6	2.7	1.5	1.4	2.5

条件では、巻上げ回転数にかかわらず、操業1時間あたりのイカ釣機の釣具ラインを繰出し・巻上げる1ストロークの数（観察ストローク数）が等しくなる。しかし実際の操業では、全てのイカ釣機を同じ巻上げ回転数で稼働させた場合、巻上げ回転数によって1時間当たりのストローク数も異なる。そこで、CPUEの算出にあたっては、待機時間がなかったものとして、巻上げ回転数ごとに1時間当たりのストローク数（ s ）を次式により算出した。

まず、ストロークに掛かる繰出し・巻上げの所要時間（ t ）を求めると、

$$t = \frac{d}{l \times 1.32} + \frac{d}{k \times 1.32} \quad (14)$$

ここで、 d は到達水深、 l は繰出し速度、 k は巻上げ速度とした。なお、釣具ラインを巻き取る八角ドラムの周長は1.32mであった。

次に、1時間（ T_{min} ）当たりのストローク数を求めると、

$$S = \frac{T_{min}}{t} \quad (15)$$

となる。

釣獲個体数 c を観察ストローク数 b で除したものを1ストローク当たりの釣獲個体数（ f ）とすると、

$$f = \frac{c}{b} \quad (16)$$

となる。

これに1時間当たりのストローク s を乗じ、釣機台数 w で除したものをCPUE（釣獲個体数 / 操業時間 / 釣機）と定義した。

$$CPUE = \frac{(f \times s)}{w} \quad (17)$$

7.2.2 釣具ライン上昇速度と擬餌針の捕捉行動に関する計測

加速度ロガー（M380L-D 2 GT, Little Leonard Co. Ltd., Tokyo, Japan）をFig. 32に示すように、釣具のワイヤーとナイロン道糸との連結部に取り付け、釣具ラインの上昇速度とアカイカの擬餌針捕捉行動に関する計測を行った。針掛かり時刻の瞬間の記録と加速度ロガーの取り付けは右舷側の中央部（10号機または11号機）のイカ釣機（Fig. 31）で行った。

イカ釣機は八角形ドラムを使用し、巻上げ回転数は毎分65回転に設定した。日没30分後から日出までの間でアカイカのまとまった釣獲が得られたときに、約2時間にわたって加速度ロガーによる計測を連続して行った。実験は、既報（黒坂ら、2008）に準じて次の

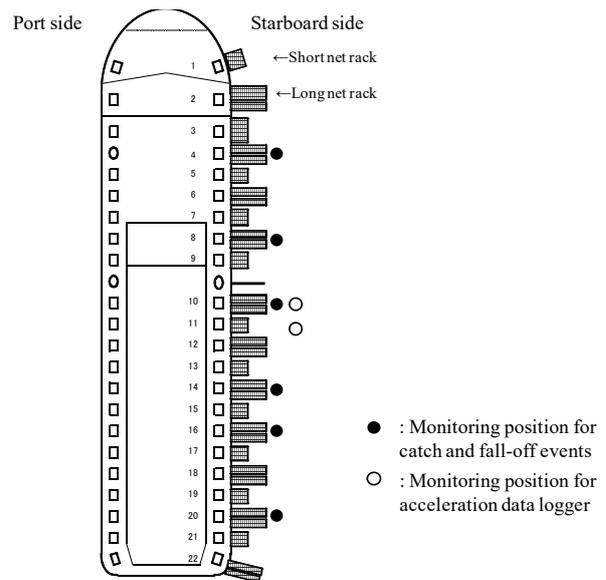


Fig. 31. Arrangement of the automated squid jigging machines on Hakurei Maru No.8, for showing the starboard side monitoring on catch and fall - off events.

Table 9. Combination patterns of drum hauling speed setting-according to the automated squid jigging machine for monitoring

Starboard side	Automated squid jigging machine	Pattern①	Pattern②	Pattern③	Pattern④	Pattern⑤	Pattern⑥
No.4	50rpm	70rpm	65rpm	60rpm	80rpm	75rpm	
No.8	60rpm	80rpm	75rpm	50rpm	70rpm	65rpm	
No.10	65rpm	50rpm	70rpm	75rpm	60rpm	80rpm	
No.14	75rpm	60rpm	80rpm	65rpm	50rpm	70rpm	
No.16	70rpm	65rpm	50rpm	80rpm	75rpm	60rpm	
No.20	80rpm	75rpm	60rpm	70rpm	65rpm	50rpm	

ように行った。まず、釣機の集中制御盤に示された値が基準値6kgfを超える急激な負荷を検知したときをアカイカによる擬餌針の捕捉した瞬間とみなした。この時点で加速度ロガーに記録された捕捉時刻と深度値の連続する2データ間の深度差から、擬餌針を捕捉する1秒前の釣具ラインの上昇速度を求めた。なお、深度データのサンプリング間隔は1Hzとし、上昇速度を秒速で求めた。

7.2.3 触腕による擬餌針捕捉率に関する解析

加速度ロガーを取り付けた釣機で合計42個体が釣獲された。この擬餌針捕捉行動の結果、触腕による擬餌

針捕捉時の釣具ラインの上昇速度は平均値1.85m/s、触腕以外の他腕による抱え込みがあった場合の上昇速度は平均値0.93m/sであった (Table 10)。

この結果をもとに、アカイカが触腕で擬餌針捕捉する際の釣具ラインの上昇速度を推定した。その場合、擬餌針を捕捉した時の掴み方が触腕か触腕以外の他腕であるかに着目して、2項分布を仮定し、釣具ラインの上昇速度 (m/s) を変数として全針掛かり数に対して触腕で捕捉する確率 (触腕捕捉率: p) との関係をロジスティック式 (Dobson and Barnett, 2008) により推定した。

触腕捕捉率 p は次のモデルで表される。

$$p = \left\{ \frac{1}{1 + \exp[-(\lambda)]} \right\} \quad (18)$$

$$\lambda = (a + \beta) \times w \quad (19)$$

ここで、 a と β は、釣具ラインの上昇速度 w の選択曲線に近似するロジスティック式パラメータである。これらのロジスティック式のパラメータを最尤法 (平松, 1992) で決定した。

擬餌針を捕捉し、針掛かりした n 個体のうち、 j 個体が触腕で掴み、 $n-j$ 個体が触腕以外の腕で擬餌針を掴んだときの最大対数尤度 (MLL) は次式で示される。

$$MLL = \sum \{ \ln(n!) - \ln(j!) - \ln[(n-j)!] + j \ln(\hat{p}) + (n-j) \ln(1-\hat{p}) \} \quad (20)$$

この値を最大にするパラメータをMS-EXCELソル

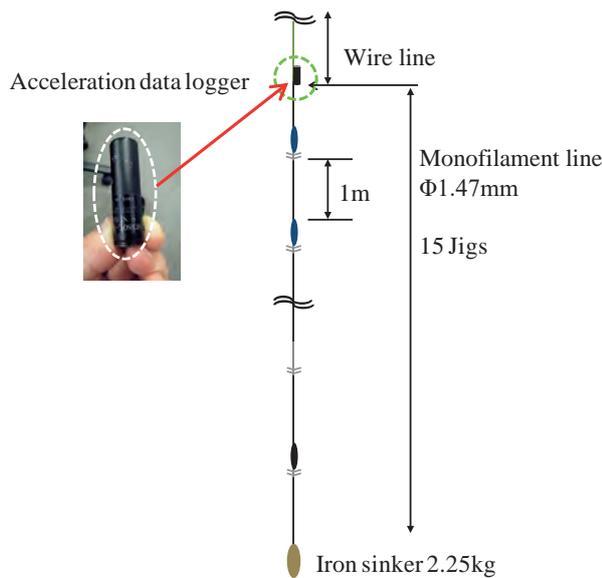


Fig. 32. Schematic diagram showing the position of acceleration data logger attached to the wire lead line.

バーによって求めた (東海, 1997)。

漁具の選択性を示すロジスティック式においては、選択性の特性を示す指標として50%選択体長 (L_{50}) や選択レンジが用いられる (Wileman *et al.*, 1996)。これにならって、擬餌針を捕捉したアカイカのうち半数が触腕で捕捉した場合の釣具ラインの上昇速度を50%触腕捕捉率 (R_{50}) と呼ぶこととする。これらはロジスティック式パラメータ a と β を用いて次のように求めることができる (Sparre *et al.*, 1993)。

$$R_{50} = -\frac{a}{\beta} \quad (21)$$

7.2.4 釣具ラインの上昇速度と巻上げ回転数との関係

釣具ラインの上昇速度と巻上げ回転数との関係について調べるため、通常操業で用いられる八角形ドラム (株式会社東和電気製作所製) (Fig. 33) が1回転したときの釣具ラインの速度の変化について求めた。八角形ドラムは、2枚のカーボンフレームの間に、8本の丸鋼を両端でねじ止めし、その軸に塩化ビニル製のパイプをはめ込んで構成されている。

Fig. 33 に示すように、ドラムには巻取り用の8本のパイプ (以下、巻取りロッド) が巻取られる釣具ラインに接するように配置されている。この巻上げドラムは中心線 (Fig. 33) に対して上下左右に対称であり、巻上げドラムの中心から巻取りロッドの中心までの長さは2通りで、長径軸は262.5mm、短径軸は176.0mmになっている。釣具ラインの上昇速度はこの巻取りロッドとドラムの中心までの距離によって決定される。この長径軸と短径軸の巻上げ長さの違いが釣具のシャクリの効果 (見上ら, 2001) を作り出している。

巻上げ回転数 k (rpm) とドラムの中心 c から巻取りロッド中心 e までの距離を j とすると、長径軸 j_1 は釣具ラインの最高速度 V_{MAX} (m/s) として、

$$V_{MAX} = \frac{2\pi j_1 k}{60} \quad (22)$$

となり、短径軸 j_2 は釣具ラインの最低速度 V_{MIN} (m/s) として、

$$V_{MIN} = \frac{2\pi j_2 k}{60} \quad (23)$$

となる。

巻上げ回転数から求める平均速度 (\hat{v}) は、

$$\hat{V} = \frac{k}{T_{\min}} \times 1.32 \quad (24)$$

Table 10. Capture statistics on hooked time and depth, in relation with the upward jig speed

Data	Position of the jigging machine	Hooked time	Hooked depth (m)	Upward jig speed immediately before hooked (m/s)
(1) Tentacle (lor 2)				
Sep. 8, 2006	Midship	19:24:42	140	2.70
Sep. 8, 2006	Midship	19:28:25	90	2.50
Jul. 13, 2007	Midship	19:10:10	150	1.90
Jul. 21, 2007	Midship	20:56:00	146	1.37
Jul. 21, 2007	Midship	20:52:30	95	1.71
Jul. 21, 2007	Midship	20:24:57	135	1.81
Jul. 22, 2007	Midship	19:41:45	122	0.95
(2) Arm (lor 2)				
Sep. 8, 2006	Midship	20:03:20	140	1.50
Sep. 8, 2006	Midship	20:10:50	145	1.40
Jul. 13, 2007	Midship	20:02:45	140	1.14
Jul. 13, 2007	Midship	21:32:50	142	0.48
Jul. 13, 2007	Midship	19:14:00	150	0.95
Jul. 21, 2007	Midship	20:06:30	148	0.29
Jul. 22, 2007	Midship	18:39:18	150	0.10
Jul. 22, 2007	Midship	18:45:37	35	1.05
Jul. 22, 2007	Midship	19:01:55	97	0.99
Sep. 10, 2007	Midship	19:31:05	84	1.05
(3) 3 or more arms				
Aug. 8, 2006	Midship	20:42:45	155	1.60
Jul. 13, 2007	Midship	21:16:30	125	0.09
Jul. 13, 2007	Midship	18:30:01	121	1.05
Jul. 13, 2007	Midship	17:40:09	118	1.24
Jul. 13, 2007	Midship	20:15:57	152	1.24
Jul. 13, 2007	Midship	18:19:12	138	0.38
Jul. 13, 2007	Midship	19:25:40	123	1.62
Jul. 21, 2007	Midship	20:56:00	148	0.0
Jul. 21, 2007	Midship	20:06:30	148	0.29
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:23	150	0.38
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:23	150	0.38
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:23	150	0.38
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:23	150	0.38
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:23	150	0.38
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:19	155	1.41
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:19	155	1.41
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:19	155	1.41
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:19	155	1.41
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:19	155	1.41
Jul. 21, 2007	Midship	19:47:19	155	1.41
Jul. 21, 2007	Midship	20:48:00	146	1.71
Sep. 19, 2007	Midship	17:52:50	29.8	1.52
Sep. 19, 2007	Midship	18:13:50	31	0.71
(4) Bite jig by the mouth				
Jul. 21, 2007	Midship	20:21:10	137	0.76
Sep. 19, 2007	Midship	17:52:50	29.8	1.52

となる。

7.3 結果

7.3.1 巻上げ回転数の最適化試験

調査操業期間中、巻上げ回転数の最適化試験については10回の操業試験を行い、合計620個体のアカイカを釣獲した。巻上げ回転数別の脱落率をFig. 34に示した。その結果、毎分50回転では脱落率19%となり、毎分65~80回転との間で有意な差が見られた (peritzの方法; 永田・吉田, 1997, $p < 0.05$)。なお、毎分60回転の条件では操業による脱落率のバラツキが大きく、他の巻上げ回転数と有意な差が見られなかった。他方、毎分80回転では脱落率48%と高く、毎分50~75

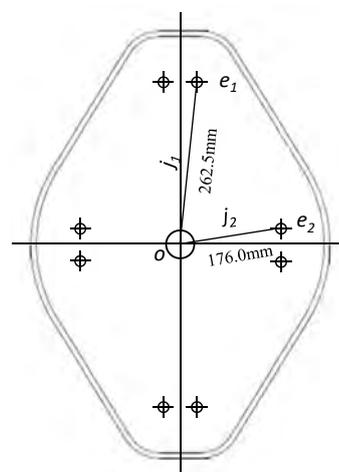


Fig. 33. Plan configuration of the octagonal hauling drum for winding the jig line.

回転との間で有意差が検出された (peritzの方法, $p < 0.05$)。以上より, 脱落率と釣具の巻上げ回転数には密接な関係があり, 巻上げ回転数を高めると脱落率が高くなり, 下げると脱落率は低くなることがわかった。

なお, 調査を行った漁期のアカイカのMLは6月のモードがML36cm (22-48cm), 7月のモードがML37cm (26-49cm)であった (Fig. 35)。この期間中の漁獲物は, 64%が50%脱落率 (F_{50}) (Kurosaka *et al.*, 2012) ML 37.4cm以上の大型サイズであった。

7.3.2 触腕による擬餌針捕捉率に関する解析

釣獲状況の目視観察からも, 釣具ラインの上昇速度が遅いときは, 触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込む傾向にあることが確認された。他方, 釣具ラインの上昇速度が速いときは, 触腕で擬餌針を捕捉する傾向にあった。巻上げ回転数に対する触腕による擬餌針の捕捉率をロジスティック式に当てはめてパラメータ a , β を推定した。その結果, 得られた巻上げ回転数に対する触腕捕捉率 (Fig. 36) を, 次式に示した。

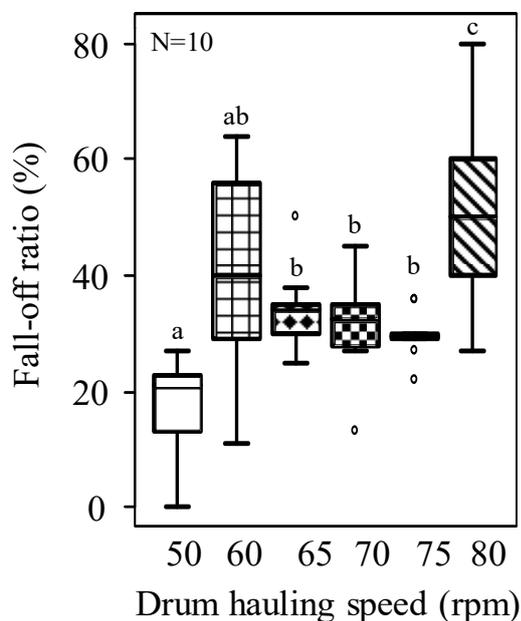


Fig. 34. Box plots analysis showing the fall-off ratio according to the drum hauling speed. Median is shown by a solid bar within the box; 25th and 75th percentiles are indicated as box ends, with maximum and minimum values are indicated as bar caps of each box plot. Different set of letter shows significant difference by Peritz's method ($p < 0.05$).

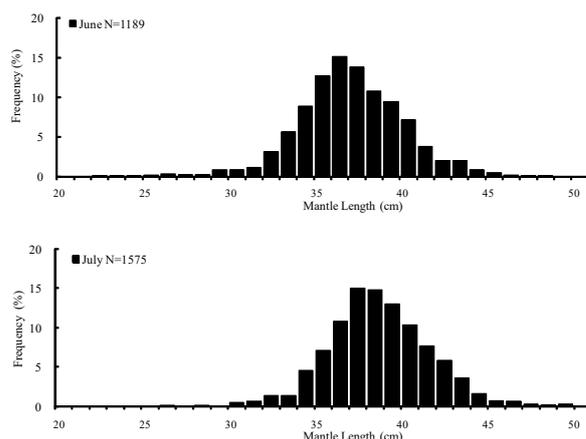


Fig. 35. Mantle length of sampled neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in June and July, 2008.

$$p = \left\{ \frac{1}{1 + \exp[-((-7.938) + 4.518 \times w)]} \right\} \quad (25)$$

また, 求められたロジスティック式のパラメータ推定値 $a = -7.938$, $\beta = 4.518$ より, 50% 触腕捕捉率 (R_{50}) 時の上昇速度は, (21) 式より1.75m/sとなった。

このことから, 釣具ラインの上昇速度が1.75m/sより速いと触腕捕捉率が高くなり, 結果として触腕破断による脱落の可能性を増大させる傾向にあることが確認された。

7.3.3 釣具ラインの上昇速度と巻上げ回転数との関係

釣具ラインの上昇速度と巻上げ回転数との関係を Fig. 37に示した。前項で求めた50%触腕捕捉率時の上昇速度1.75m/sと巻上げ回転数との関係をみると, 毎分60回転以下では上昇速度が0.92~1.65m/sの範囲となって触腕捕捉率の閾値である1.75m/sを下回り, 毎分65回転以上では上昇速度が1.79m/s~2.20m/sの範囲となって1.75m/sを超える長径軸の最高速度が算出された。

この結果を踏まえて操業試験を行った。同期設定の6台のイカ釣機1台当たりの操業回数は合計10回, 操業時間は合計10時間, 観察ストローク数は合計146ストロークであった。(15) 式を利用して1時間当たりのストローク数を求めた結果, 毎分50回転で15.4回, 60回転で17.1回, 65回転で17.8回, 70回転で18.5回, 75回転で19.1回, 80回転で19.7回であった。次に, (16) 式を利用してストローク当たりの釣獲個体数を求めた結果, 毎分50回転で0.5個体, 60回転で0.5個体, 65回転で0.8個体, 70回転で1.2個体, 75回転で1.0

個体, 80回転で0.4個体であった。(17)式を利用して巻上げ回転数別のCPUEを求めた (Fig. 38)。その結果, CPUEは毎分70回転, 75回転でそれぞれ21.4個体, 18.3個体と高い値を示し, 毎分50回転~65回転および80回転との間に有意差が見られた (peritzの方法, $p < 0.05$)。以上より, 毎分80回転では, CPUEは8.5個体と低く, 巻上げ回転数を上げて必ずしも釣獲向上には結びつかないことが判明した。

7.4 考 察

村田ら (1981) は, アカイカが触腕破断後も相当数が生き残り, 成長パターンは正常個体と変わらないと推察している。また, 他のイカ類の触腕は餌生物の捕捉に重要な役割を果たすとされるが, アカイカの場合は必ずしも必要器官とは言えないとしながらも, 再生の所要日数および生存率については不明であり, 交接時になんらかの支障をきたすこともあり得ると考察している。

さらに, 1979, 1980年10月~11月の155°E以西海域で, 流し網と釣り調査で漁獲されたアカイカの再生触腕を持つ個体と持たない個体のML組成を比較した結果, 再生触腕を持つ個体の方がML 30cm未満モードの小型サイズが多いことを報告している (村田ら, 1981)。Kurosakaら (2012) は, 小型サイズの方が脱落率が高いことを報告しており, その要因の1つは擬餌針捕捉行動にあると考察している。大型サイズは上昇する釣具ラインに対して, 触腕による擬餌針捕捉を行い, その後に漏斗による強い海水吐出推進力で釣具ラインの上昇に対応し, 触腕以外の他腕を使ってしっかりと擬餌針を抱き込むものと推察している。他方, 小型サイズは吐出推進力が弱いため触腕で擬餌針を捕捉した後に, 上昇する釣具ラインに追いつかず触腕のみで巻上げられて, 破断に至るものと推察している。村田らの報告と黒坂らの報告は小型サイズが触腕破断しやすい点で一致しており, 小型サイズをできるだけ針掛かりさせない方策が必要である。

アカイカの吐出推進力は体サイズによって異なり (Bartol *et al.*, 2001), 遊泳能力が釣獲と脱落現象にむすびつく重要な手掛かりかもしれない。そこでまず, 釣具ラインの上昇速度が速くなると触腕捕捉の可能性が高くなることについて考察する。ここで, 毎分65回転の操業条件で八角ドラムの形状から計算した上昇速度は最高速度1.79m/s, 最低速度1.20m/s となった (Fig. 37)。一方, 加速度ロガーを用いて得た釣具ラインの上昇速度 (Table 10) は, 毎分65回転で釣具ラインを巻上げた際に観測したデータである。観

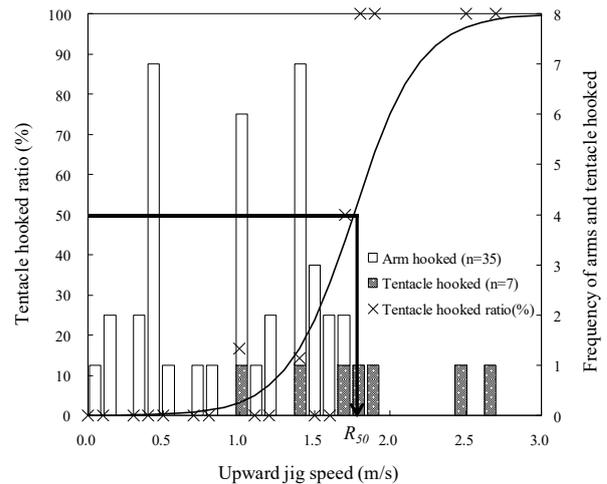


Fig. 36. Logistic curve analysis for tentacle hooked ratio according to the upward jig speed.

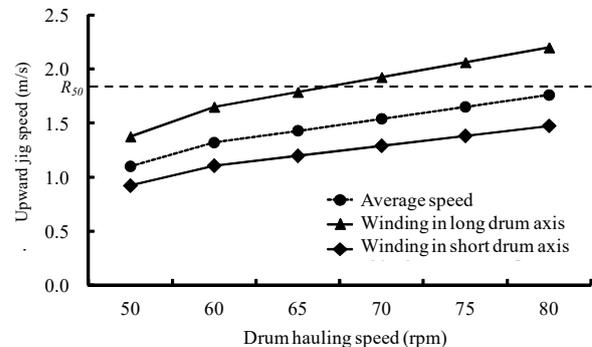


Fig. 37. Calculated jig speed by the winding drum shape, according to the drum hauling speed.

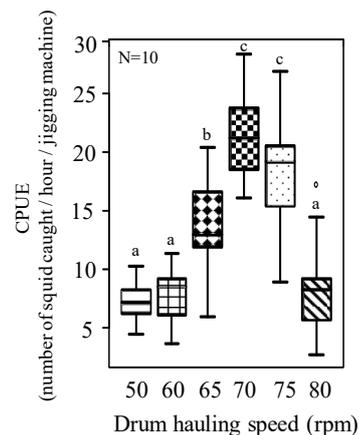


Fig. 38. Box plots analysis showing the CPUE (number of squid caught / hour / line) according to the drum hauling speed. Median is shown by a solid bar within the box; 25th and 75th percentiles are indicated as box ends, with maximum and minimum values are indicated as bar caps of each box plot. Different set of letter shows significant difference by Peritz's method ($p < 0.05$).

測データは触腕捕捉の平均速度が1.85 m/s、触腕以外の腕の平均速度が0.93m/sとなり、いずれもドラムから求めた上昇速度の範囲外にあった。最低速度が計算値より観測値が下回ったのは、海中での釣具に対する流体抵抗や摩擦抵抗が大きく関わっていると考えられる(五十嵐・見上, 1978)。他方、最高速度が計算値より観測値が上回ったのは、船体の運動が釣具ラインに伝搬すること、ならびに釣具ラインがドラムに巻取られるうちに、除々に直径が大きくなり釣具ラインの上昇速度が加速することに起因する。また、毎分60回転の最高速度は1.65m/s (Fig. 37) と、 R_{50} の1.75m/sを下回っているにもかかわらず、脱落率の平均値は44%と高かった (Fig. 34)。これは前述の釣具ラインに影響を与える要素が加わり、釣具ラインの巻上げ回転数が加速したため、触腕捕捉率が高まったことによるものと推察された。さらに、毎分80回転ではCPUEが向上しなかった原因も同様の影響が考えられる。

渡部ら (1995) は大型サイズのアカイカを効率的に釣獲するため、釣具ラインの上昇速度を0.8~1.2 m/sに設定して巻上げ回転数を変えた操業で釣獲試験を行った。その結果、上昇速度を遅くすると脱落は低減されたが、CPUEも低下することを報告している。本研究でもアカイカの脱落率と巻上げ回転数との関係を調べた結果、巻上げ回転数を下げたときに脱落率、触腕捕捉率がともに低減されたが、CPUEも低下した。この原因として、 F_{50} (Kurosaka *et al.*, 2012) 以上の大型サイズが漁獲物に64%も占めていたため、脱落率低減効果が見られなかったと考えられる。他方、毎分70~75回転でCPUEが高まった (Fig. 38) のは、巻上げ回転数が増したことでストローク数と釣獲個体数が増したためである。CPUEは1ストローク当たりの釣獲個体数に1時間当たりのストローク数を乗じたものである。以上より、釣獲向上にはML35cm以上の大型サイズでは、巻上げ回転数を毎分70~75回転の範囲で釣機の巻上げ回転数を上げてストローク数を増すと効果的である。他方、触腕破断の可能性が高いML35cm未満の小型サイズでは、釣具ラインの上昇速度が1.75 m/s以下である毎分60回転よりも遅くすることが触腕捕捉率と脱落率の低減につながり効果的である。

以上のことから、アカイカの釣獲向上には、季節や漁場で釣獲対象の体サイズに応じて巻上げ回転数を制御することが、脱落を低減させる有効な方法であることを解析結果と実証例とともに提案した。すなわち、大型サイズ主体の漁場探索 (小河, 2002; 小河, 2003) を行い、巻上げ回転数の設定によって大型サイズの釣獲を向上させ、同時に釣獲される小型サイズに

ついては他腕による擬餌針捕捉を増大させることで触腕破断を低減し、合理的な資源利用を図れるものと考えられる。

第四章 総合考察

本研究はアカイカの釣獲技術の向上を目的として、操業現場で多発する釣り落とし現象、すなわち脱落の発生機構とその対策を明らかにしたものである。

第I章では、北太平洋のアカイカ漁業の変遷と釣り漁業の実態について明らかにした。アカイカ漁業は1970年代から流し網によって漁獲されてきたが、1992年の国連決議で公海上の流し網操業がモラトリアムとなり、1993年以降は釣り漁業へと転換した。現在は主に日本、台湾、中国によって操業が行われており、外国漁船の隻数が年々増大し、かつ操業海域も拡大しつつあり、北太平洋のアカイカ漁場は国際的な漁場の下での開発と管理が要求されてきている (黄金崎, 2002)。これらの海域におけるアカイカ資源を持続的に有効利用していくことが、イカ釣り漁業全体の経営安定にもつながっていくものである。このためにも北太平洋のアカイカ漁業について、操業秩序の確立が急がれるとともに、北太平洋のアカイカ資源の国際管理体制の構築が必要であることを指摘した。

第II章では、資源の管理方策について検討するため、ミトコンドリアDNA分析の塩基配列から推測したアカイカの集団構造について解析した。その結果、この北太平洋の公海漁場に分布する本種は、ほぼ一つの遺伝的集団とみなせ、着業船数が無制限に増えて過剰な漁獲圧がかかる前に、国際的な漁業管理が必要であること指摘した。他方、調査対象とした北太平洋とインド洋のアカイカには海域特有の塩基置換がみられた。現在、インド洋などの南半球では、アカイカ漁業は行われていないが、未利用資源として今後の漁業が成立する可能性もある (ダニング, 1998)。その際、社会的に問題になっている食品の原産地表示のためにも、本研究で得られた海域特有の塩基置換部位が利用できることを提言した。

以上の2章をもとに、アカイカ資源の適切な漁業管理を行うには、北太平洋のイカ釣り操業過程の実際を理解し説明する必要がある。そこで第三章では、触腕破断による釣り落としの減少を目的として擬餌針の巻上げ過程の観測結果から、アカイカの脱落現象を次の3パターンに分類した。擬餌針に触腕のみが掛かって巻上げられてきたものを「水中脱落」、海面から出てガイドローラーに触れる前に脱落したものを「水上脱落」、アカイカがガイドローラーに接触した際の脱

落を「接触脱落」とした。2006～8年の3年間の調査によると、それらを合計した脱落率は針掛かりした総個体数の36%で、中でも水中脱落の割合が最も高く、触腕のみで針掛かりした個体の脱落率は92%であった。さらにロジスティック式を適用して外套背長と脱落率との関係を求めたところ、小型サイズで脱落率が高く、擬餌針から脱落する50%脱落率 (F_{50}) 時の外套背長 (ML) は37.4cmと推定された。また釣獲、脱落個体の針掛かり状態と体サイズを観測した結果、3腕以上が針掛かりして釣獲された個体は触腕で針掛かりした個体に比べ有意に大型であった。従って、 F_{50} よりも小型サイズで脱落率が高くなるのは擬餌針を触腕で捕捉し、触腕破断を起こすことによるものと推定された。一方、 F_{50} よりも大型サイズでは小型に比べて推進力が大きいので、触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込む割合が高まり、脱落率が低くなるものと考えられた。そこで、触腕がどの程度の荷重で破断するのか触腕の破断強度を計測したところ、 ML 41.4cmより小型サイズでは触腕1本の破断強度が体重と同程度であることが示された。このことから小型アカイカは触腕1本で擬餌針を捕捉した場合、触腕破断の可能性が残ることが示唆された。

次に、脱落現象の発生要因については、水産庁の調査(水産庁, 1996)により、風と荒天で脱落率の傾向が異なり、ビューフォート風力階級に基づく風力5以上の荒天の場合に船首船尾の釣機で脱落率が高かったことから、船体運動との関係が示唆されている。そこで第IV章では脱落率と船体運動との関係を検証することとし、船体運動が脱落に及ぼす影響を具体化するためにロジスティック回帰分析を行った。2003～5年に大型イカ釣り漁船第八白嶺丸(276GT, 自動イカ釣機: 左舷21台・右舷22台)の釣機毎の釣獲個体数・脱落個体数を日没前後または夜間に1回2時間計数した結果、船体の釣機位置別の脱落発生状況は、風力4以下の風では釣機が船首船尾に近いほど、また釣機に付属する受け台は長い方が脱落は少なかった。このことから穏やかな海況では、ピッチングやローリングの影響が相対的に大きい釣具ラインほど脱落が有意に少なくなる傾向があり、これは本種の擬餌針捕捉行動に依存するものと推察された。すなわち、船体運動に伴う釣具の運動に反応して触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込む行動が促されたと考えられる。一方で、風力5以上の荒天時では、船首船尾の釣機で脱落率が顕著に高まることが観測されている。

このように船体の運動が脱落に影響していることが明らかとなった。この現象を解明するため、第V章では加速度ロガーを使用して船体および釣具の運動を計

測し、船体の運動が釣具に伝搬されているのかの検証を行った。検証にあたっては、ガイドローラーおよび釣具ラインにて記録される加速度信号の特性を調べるために、高速フーリエ変換(FFT)によるパワースペクトル密度(PSD)の計算を行った。その結果、ガイドローラー位置で検出された船体の卓越周期0.125～0.090Hzと同周期のスペクトルが海中の釣具でも測定された。この周期は船体運動の周期と一致しているため、船体の運動が海中の釣具に伝搬することが明らかとなった。荒天時の船体運動が擬餌針に伝搬した場合、アカイカが触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込む前に触腕破断を起こしやすくなっているものと考えられる。以上より、荒天のときに脱落率が高くなる原因は船体の運動が起因していることを明らかにした。一方で風時には、船体中央部で脱落が高くなるのは船底に付属するビルジキールの渦抵抗の乱れが原因である可能性が示唆された。

このように脱落の発生原因は、船体の運動が釣具ラインに伝搬することで触腕破断に関係していることが推察された。そこで第VI章では、イカ釣機の巻上げによる釣具ラインの上昇速度に着目し、アカイカの擬餌針捕捉行動に及ぼす影響について分析した。まず擬餌針からのアカイカの脱落を低減するために、巻上げ過程における釣具の運動とアカイカの針掛かり状態との関係を把握した。イカ釣機で使用する釣具ラインのワイヤーとナイロンテグスの連結部に加速度ロガーを取付けて擬餌針の運動を計測した。釣機の集中制御盤が基準値6kgfを超える値を検知した場合をアカイカによる擬餌針の捕捉とみなし、捕捉時刻と深度値を記録した。この時点で加速度ロガーに記録された深度値の連続する2データ間の深度差から、アカイカが擬餌針を捕捉する直前の釣具ラインの上昇速度を求めた。また、この擬餌針捕捉に対応するアカイカの釣獲および脱落状態を記録した。その結果、1.50m/s前後では触腕以外の他腕で擬餌針を抱え込みし、2.50m/s程度の速度では触腕だけで擬餌針を捕捉する傾向が認められた。これらの現象より、アカイカが擬餌針を触腕で捕捉するか、それとも触腕以外の他腕で抱え込む行動には、釣具ラインの上昇速度による閾値が存在するものと推察された。

最後に第VII章として、釣獲過程におけるアカイカの脱落現象を低減する方策として、釣具の巻上げ回転数に着目し、毎分50～80回転の条件で6段階にこの回転数を変化させて操業を行い、脱落率との関係を調べた。その結果、毎分50回転では脱落率が低くなった。アカイカが触腕で擬餌針を捕捉する釣具ラインの上昇速度を推定するため、触腕による捕捉率(針掛かり個

体総数に占める触腕による擬餌針捕捉個体数の割合)と釣具ラインの上昇速度との関係を検討した。その結果から、擬餌針を捕捉したアカイカのうち半数が触腕で捕捉した場合の釣具ラインの上昇速度を50%触腕捕捉率(R_{50})とすると、この時の上昇速度は1.75m/sと推定された。このことから上昇速度が1.75m/sより大きいと触腕による捕捉率が高くなり脱落が発生しやすいものと推察された。また、巻上げ回転数と R_{50} の関係を見ると、毎分60回転以下では上昇速度が0.92~1.65m/sの範囲となって1.75m/sを下回り、毎分65回転以上では上昇速度が1.79~2.20m/sの範囲となって1.75m/sを超える速度が検出された。これらの結果を踏まえて、操業試験を行った。その結果、釣具最下端の降下深度を150mとして操業した場合、毎分70~75回転でCPUE(釣獲個体数/操業時間/釣機)は最も高くなった。これは釣機の巻上げ回転数が速くなったことで、釣具を繰出し・巻上げる1連の動き、1ストローク当たりの釣獲個体数が増えたためである。CPUEは1ストローク当たりの釣獲個体数に1時間当たりのストローク数を乗じたものである。この操業試験において毎分50回転でCPUEが高くならなかったのは、この期間中に釣獲されたアカイカが F_{50} 付近の大型サイズであったため、巻上げ回転数を下げてもCPUEは向上しないものと考えられた。以上より、釣獲向上には ML 35 cm以上の大型サイズでは毎分70~75回転に巻上げ回転数を上げてストローク数を増し、 ML 35 cm未満の小型サイズには巻上げ回転数を下げて脱落率を低減させる方策が有効であることを提案した。

日本のアカイカ釣り漁業は、おもに夏イカ漁と冬イカ漁の2つに分かれる。夏イカ漁は5月中旬頃から東経170°以東海域の北緯37°付近から始まり、8月頃には北緯46度付近にまで達する(黄金崎, 2002)。釣獲対象はおもに秋生まれ群主体となる。他方、冬イカ漁は10月上旬から2月下旬まで三陸沖合で操業が行われ(黄金崎, 2002)、釣獲対象は冬・春生まれ群となる。本研究の対象となったアカイカは夏イカ漁の秋生まれ群である。したがって、今回得られた知見が冬イカ漁の冬・春生まれ群にも適用されれば、小型のアカイカに対して脱落を低減させ、合理的に釣獲することが可能となる。

第I章で触れたように北太平洋では中国、韓国、台湾などの複数の国々の漁船数が年々増加している国際漁場である。これらの外国船は1年を通して、おもに東経170°以西で操業を行っており、冬・春生まれ群を対象に釣獲している。近年の三陸沖合のアカイカ冬春生まれ群を対象とする冬イカ漁では、比較的資源水準

の高かった2009年(1~3月)から2010年(1~3月)に漁獲量が5分の1に減少(2,298トン)したことから資源の悪化が懸念された(酒井, 2012)。2011年の冬漁では漁獲量は前年より約3倍程度増加したが(6,900トン)、いまだ高い水準ではなく、資源状態は横ばいと考えられる(酒井, 2012)。このような実態でも、現状で禁漁時期や海域の設定を実施することや漁船隻数などの制限などの漁獲努力量を規制することはできない。

現時点では我が国が行える対応策としては、大型サイズ主体に漁場探索を行い、イカ釣機の巻上げ回転数を制御して大型サイズの釣獲を向上させ、同時に釣獲される小型サイズに関しては、他腕による擬餌針捕捉を増大させ、脱落を低減させることである。これに加えて、釣獲された小型サイズのアカイカについては、雌雄と漁獲数量を正確に把握することが小型サイズ保護の管理方策として妥当と考えられる。今後は国際的な枠組みでの漁業管理が必要であり、具体的には小型サイズを保護する保護区や禁漁期・漁区についても検討するとともに、小型サイズの釣獲や脱落といった不合理な資源利用の状況が改善され、我が国のアカイカ釣り漁業の経営安定につながるとともに、持続的な普及の利用に向けて国際的な動きが始まることを期待する。

謝辞

本研究を取りまとめるに当たって、終始一貫して懇切丁寧にご指導賜った東京海洋大学名誉教授 有元貴文博士に対し、深甚の謝意を表します。

この研究の当初から深く関わり、技術的な指導と有益な示唆を賜るとともに、漁業の面白さを教えて頂きました東京海洋大学学術研究院 海洋生物資源学部門 准教授 稲田 博史博士に対し、ここに謹んで感謝の意を表します。

また、東京海洋大学理事(研究・国際担当)・副学長 東海 正博士、同教授 酒井 久治博士には、本論文の原稿をご高覧頂き、多くの有益な助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。

また、本研究をまとめる機会を与えて頂きました同名名誉教授 竹内 正一博士に深く感謝の意を表します。

操業実験に当たって調査船として協力頂いた、元第八白嶺丸の宮崎 勝男元漁労長(現 第一寶来丸)、浜野 弘元漁労長、竹中 幸元元漁労長はじめ元乗組員の宮崎 卓也氏(現 第一寶来丸)、宮崎 政宏氏(現第18白嶺丸漁労長)ほか乗組員各位に御協力頂きました。皆様に深謝致します。

国立研究開発法人水産研究・教育機構西海区水産研究所所長 渡部 俊広博士，同中央水産研究所海洋・生態系研究センター主任研究員 赤松 友成博士，同水産工学研究所漁業生産工学部主任研究員 三好 潤博士，同中央水産研究所水産生命情報研究センター主任研究員 柳本 卓博士，同中央水産研究所海洋・生態系研究センター研究員 重信 裕弥博士，同国際水産資源研究所外洋資源部長 一井 太郎博士，一般社団法人漁業情報サービスセンター技術専門員 酒井 光夫博士ならびに国立研究開発法人水産研究・教育機構水産大学校海洋生産管理学科准教授 若林 敏江博士にはアカイカの漁業に関わる多くの情報を提供頂くとともに，漁業・生物学的観点等からの数多くのアドバイスを賜りました。厚く御礼申し上げます。

統計学的解析手法について有益なる助言をいただきました，群馬大学社会情報学部教授 青木 繁伸博士に深謝致します。

株式会社MMT 村元 宏行氏，長崎大学海洋未来イノベーション機構環東シナ海環境資源研究センター教授 河邊 玲博士ならびに国立研究開発法人水産研究・教育機構日本海区水産研究所資源管理部任期付研究員 古川 誠志郎博士には加速度ロガーの解析方法について様々なアドバイスをいただきました。皆様に深く感謝致します。

国立研究開発法人水産研究・教育機構（水産総合研究センター）歴代理事の小松 正之博士（現 東京財団上席研究員），長尾 一彦氏（現 一般社団法人海外まき網漁業協会常務理事）ならびに武井 篤氏（現 全国まき網漁業協会専務理事），国立研究開発法人水産研究・教育機構（水産総合研究センター）開発調査センター歴代所長の橋本 明彦氏（現 全国遠洋沖合漁業信用基金協会専務理事），熊谷 徹氏（現 内閣府総合海洋政策推進事務局参事官（水産・環境保全担当）），中津 達也氏（現 国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道海区水産研究所所長）ならびに井上 清和氏（現 水産庁増殖推進部研究指導課長），開発調査センター歴代副所長の高橋 正憲博士（現 特定非営利活動法人 水産業・漁村活性化推進機構事業部専任指導員），廣川 純夫氏ならびに堀川 博史博士，また開発調査センターの皆様には，研究の機会を与えていただくとともに，長期にわたり研究を応援して頂きました。とりわけ，開発調査センター底魚・頭足類開発調査グループリーダー山下 秀幸博士には様々な助言を賜るとともに，開発調査センター事業推進役小河 道生氏には研究と業務のサポートをして頂き，長期に亘りご鞭撻，ご指導をいただきました。

また，国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工

学研究所漁業生産工学部漁具・漁法グループ長 越智 洋介博士，同開発調査センター底魚・頭足類開発調査グループサブリーダー高橋 晃介氏には，調査の計画立案に御協力いただくとともに，様々な面から研究をサポートして頂きました。高橋 鏡子氏（同開発調査センター元職員）にはデータの入力や整理等において協力頂きました。石渡 未紀氏（同開発調査センター）には，文献の収集整理において協力頂きました。皆様に感謝致します。

さらに，Dr. Chris Norman (Japan Scientific Texts)，権丈 英理子博士には英文の校閲，有益な助言を賜るとともに，ご指導いただきました。

国立研究開発法人水産研究・教育機構開発調査センター資源管理開発調査グループの廣瀬 太郎博士（現 同瀬戸内水産海区水産研究所業務推進課長），鶴 専太郎博士，小田 憲太郎氏，岡谷 良喜氏（元職員），高田 順司氏（現 長崎県庁），富田 貴子氏には様々な面からサポート頂きました。皆様に深く感謝致します。

最後に，社会人になってからの博士課程入学を快く承諾し，どのような状況においても応援し，研究に費やす時間の確保に協力してくれた，素晴らしい妻に心から感謝します。

文献

- Akamatsu T., Wang D., Wang K. and Naito Y., 2005 : Biosonar behavior of free-ranging porpoises. *Proc. R. Soc. Lond. B.*, **272**, 797-801.
- Akasaki T., Nikaido M., Tsuchiya K., Segawa S., Hasegawa M. and Okada N., 2006 : Extensive mitochondrial gene arrangements in coleoid Cephalopoda and their phylogenetic implications. *Mol. Phy. Evol.*, **38** : 648-658.
- 天下井清，2001 : 第6章 漁船と漁具の運動，「漁具物理学」（松田 皎編），成山堂書店，東京，pp. 102-119.
- Bartol I. K., Mann R. and Patterson M.R., 2001a: Aerobic respiratory costs of swimming in the negatively buoyant brief squid *Lolliguncula brevis*. *J. Exp. Biol.*, **204**, 3639-3653.
- Bartol I. K., Patterson M. R. and Mann R., 2001b: Swimming mechanics and behavior of the shallow-water brief squid *Lolliguncula brevis*. *J. Exp. Biol.*, **204**, 3655-3682.
- Bower J. R. and Ichii T., 2005 : The red flying squid (*Ommastrephes bartramii*) : A review of recent

- research and the fishery in Japan. *Fish. Res.*, **76** : 39-55.
- Bradbury H. E. and Aldrich A., 1969 : Observations on locomotion of the short-finned squid, *Illex illecebrosus illecebrosus* (Lesueur, 1981) in captivity. *Can. J. Zool.*, **47**, 741-744.
- Burke W. T, Freeberg M. and Miles E. L., 1994 : United Nations Resolutions on driftnet fishing- An unsustainable precedent for high seas and coastal fisheries management. *Ocean Dev. Int. Law.*, **25**, 127-186.
- Chen X. J., 1996 : On the broken strength of *Todarodes pacificus* and *Ommastrephes bartramii* tentacles. *J. Shanghai. Fish. Univ.*, **5**, 115-118 (in Chinese).
- Chen X. J., Liu B. L. and Chen Y., 2008 : A review of the development of Chinese distant-water squid jigging fisheries. *Fish. Res.*, **89**, 211-221.
- Clement M. D., Posada D, Crandall K. A., 2000 : TCS : A computer program to estimate gene genealogies. *Mol. Evol.*, **9**, 1657-1659.
- Dobson A. J., 1993 : 統計モデル入門 (田中 豊, 森川敏彦, 栗原幸次訳), 共立出版, 東京, 176pp.
- Dobson A. J. and Barnett A. G., 2008 : Binary variables and logistic regression, third ed., in "An Introduction to Generalized Linear Models" (ed. by Dobson, A.J. and Barnett, A.G.), CRC Press, London, 123-147.
- 蝦名儀富, 高橋晃介, 越智洋介, 2010 : 平成21年度海洋水産資源開発事業報告書 (システム対応型 : 遠洋底びき網〈全層トロール〉 : 南インド洋西部公海域), 独立行政法人水産総合研究センター, 神奈川, 24pp.
- 蝦名儀富, 柳本 卓, 星野浩一, 岡本 誠, 高橋晃介, 越智洋介, 2011 : 平成22年度海洋水産資源開発事業報告書 (システム対応型:遠洋底びき網〈全層トロール〉 : 南インド洋西部公海域), 独立行政法人水産総合研究センター, 神奈川, 59pp.
- Excoffier L., Laval G. and Schneider S., 2005 : Arlequin ver. 3.0 : An integrated software package for population genetics data analysis. *Evol. Bioinform.*, **1**, 47-50.
- Excoffier L., Smouse P. E. and Quattro J. M., 1992 : Analysis of molecular variance inferred from metric distance among DNA haplotypes: application to human mitochondrial DNA restriction data. *Genetics*, **131**, 479-491.
- Fleming P. A., Muller D. and Bateman P. W., 2007 : Leave it all behind : a taxonomic perspective of autotomy in invertebrates. *Biol. Rev.*, **82**, 481-510.
- Flores E. E. C., 1983 : Laboratory observations on the visual attack of the squid, *Todarodes pacificus*. *Mem. Natl. Mus. Victoria*, **44**, 205-212.
- Folmer O., Black M., Hoeh W., Lutz R. and Vrijenhoek R., 1994 : DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Mol. Mar. Biol. Biotech.*, **3**, 294-299.
- Foyle T. P. and O'Dor R. K., 1987 : Predatory strategies of squid (*Illex illecebrosus*) attacking small and large fish. *Mar. Behav. Physiol.*, **13**, 155-168.
- Guo B. H., Yada S., Toda M. and Inada H., 1997 : Mechanical characteristics of improved jigs to prevent squid falling off in the capturing process. *Fish. Sci.*, **63**, 9-14.
- 平松一彦, 1992 : 最尤法による水産資源の統計学的研究 -パラメータ推定とモデル選択-. 遠洋水研報, **29**, 57-114.
- Ichii T., Mahapatra K., Okamura H. and Okada Y., 2006 : Stock assessment of the autumn cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the North Pacific based on past large-scale high seas driftnet fishery data. *Fish. Res.*, **78**, 286-297.
- Ichii T., Mahapatra K., Sakai M., Inagake D. and Okada Y., 2004 : Differing body size between the autumn and the winter-spring cohorts of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) related to the oceanographic regime in the North Pacific : a hypothesis. *Fish. Oceanogr.*, **13**, 295-309.
- 五十嵐脩蔵・見上隆克, 1978 : いか釣漁業の機械化に関する研究Ⅱ 手巻きドラムと自動いか釣機による釣針の運動の比較. 北大水産彙報, **29**, 19-24.
- 池田良穂, 2006 : 第5章 波の中での船の運動, 「船のしくみ」(池田良穂編), ナツメ社, 東京, pp. 112-166.
- 池田良穂, 2009 : 第2部 船のしくみ, 「プロが教える船のすべてがわかる本」(池田良穂編), ナツメ

- 社, 東京, 74-76.
- 池田良穂・小松 清・姫野洋司・田中紀男, 1977: 横揺れ減衰力について-ビルジキールによる船体表面圧力効果-. 関西造船協会誌, **165**, 31-40.
- 稲田博史・廣川純夫・谷津明彦, 1996: 大型アカイカの昼釣り操業における水中灯の効果. 日水誌, **62**, 73-77.
- Katugin O., 2002: Patterns of genetic variability and population structure in the North Pacific squids *Ommastrephes bartramii*, *Todarodes pacificus*, and *Beryteuthis magister*. *Bull. Mar. Sci.*, **71**, 383-420.
- Kawabe R., Nashimoto K., Hiraishi T., Naito Y. and Sato K., 2003: A new device for monitoring the activity of freely swimming flatfish, Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Fis. Sci.*, **69**, 3-10.
- Kier W. M. and van Leeuwen J. L., 1997: A kinematic analysis of tentacle extension in the squid *Loligo pealei*. *J. Exp. Biol.*, **200**, 41-53.
- Kimura M., 1980: A simple method for estimating evolutionary rate of base substitutions through comparative studies of nucleotide sequences. *J. Mol. Evol.*, **16**, 111-120.
- 黄金崎栄一, 2002: 北太平洋でアカイカ操業を行う外国船の状況. 「平成12年度イカ類資源研究会議報告」, 日本海区水産研究所, 新潟, pp. 88-91.
- 窪寺恒己, 2004: 小笠原近海でDSLを用いたアカイカ摂餌行動の観察. 「平成15年度イカ類資源研究会議報告書」, 日本海区水産研究所, 新潟, pp. 72-77.
- 黒坂浩平, 2005: 平成17年度海洋水産資源利用合理化開発事業(いか釣)報告(速報)-北太平洋中・東部海域-, 独立行政法人水産総合研究センター, 神奈川, 15pp.
- 黒坂浩平・越智洋介・小河道生, 2009: 平成20年度海洋水産資源開発事業報告書(資源対応型: いか釣 I (北太平洋中・西部海域)), 独立行政法人水産総合研究センター, 神奈川, 57pp.
- 黒坂浩平・山下秀幸・越智洋介・小河道生・赤松友成・稲田博史・渡部俊広, 2009: 自動イカ釣機の釣具ライン巻き上げ速度がアカイカの擬餌針捕捉行動に及ぼす影響. 日水誌, **75**, 83-85.
- Kurosaka K., Yamashita H., Ogawa M., Inada H. and Arimoto T., 2012: Tentacle-breakage mechanism for the neon flying squid *Ommastrephes bartramii* during the jigging capture process. *Fish. Res.*, **121-122**, 9-16.
- 松井正文・小池裕子, 2003: 生物進化と保全遺伝学, 「保全遺伝学」(小池裕子, 松井正文編), 東京大学出版, 東京, pp. 19-39.
- マルコム・ダニング, 1998: 南半球におけるアカイカ漁業生物学および資源としての可能性に関する総説, 「外洋性大型イカ類に関する国際シンポジウム講演集」(奥谷喬司 編), 海洋水産資源開発センター, 東京, pp. 63-74.
- 見上隆克・山下成治・管木清治, 2001: 自動イカ釣機の巻上げドラム形状と釣針速度の制御. 日水誌, **67**, 481-488.
- Murata M., 1990: Oceanic resources of squids. *Mar. Behav. Physiol.*, **18**, 19-71.
- 村田 守・石井 正・大迫正尚, 1981: アカイカの触腕再生について. 北水研報告, **46**, 1-14.
- Murata M. and Hayase S., 1993: Life history and biological information on flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the North Pacific Ocean. *Bull. Int. Nat. North Pacific Comm.*, **53**, 147-182.
- 村田 守・中村好和, 1998: 北太平洋におけるアカイカの季節的回遊および日収鉛直移動. 「外洋性大型イカ類に関する国際シンポジウム講演集」(奥谷喬司 編), 海洋水産資源開発センター, 東京, pp. 11-28.
- 牟田 稔・山下秀幸・笹尾 信・越智洋介・小河道生, 2005: 平成15年度海洋水産資源利用合理化開発事業報告書(いか釣: 北太平洋中・東部海域, 南太平洋西部海域), 独立行政法人水産総合研究センター, 神奈川, 244pp
- 長澤和也・森 純太・岡村 寛, 1998: 北太平洋のアカイカ群の生物学的指標としての寄生虫. 「外洋性大型イカ類に関する国際シンポジウム講演集」(奥谷喬司 編), 海洋水産資源開発センター, 東京, pp. 47-62.
- 永田 靖・吉田道弘, 1997: 統計的多重比較法の基礎, サイエンティスト社, 東京, 187pp.
- 中谷 肇・高橋是太郎, 2003: 第4章 加工技術と漁獲物の有効利用, 「スルメイカの世界-資源・漁業・利用」(有元貴文・稲田博史 共編), 成山堂書店, 東京, pp. 243-267.
- Nei M. and Tajima F., 1981: DNA polymorphism detectable by restriction endonuclease. *Genetics*, **97**, 145-163.
- Nei M., 1987: Molecular Evolutionary Genetics, Columbia University Press, New York, 512pp.

- Northridge S. P., 1991 : Driftnet fisheries and their impacts on nontarget species : a worldwide review. *FAO. Fish. Tech. Pap.*, **320**, 29-45.
- 小河道生, 2002 : 平成12年度海洋水産資源利用合理化開発事業 (いか釣 : あかいか) (北太平洋中部海域), 海洋水産資源開発センター, 東京, 176pp.
- 小河道生, 2003 : 平成13年度海洋水産資源利用合理化開発事業 (いか釣 : あかいか) (北太平洋中・東部海域), 海洋水産資源開発センター, 東京, 148pp.
- 奥谷喬司, 2005 : アカイカ, 「原色世界イカ図鑑」(奥谷喬司 編), 全国加工いか加工業組合, 東京, 253pp.
- Okutani T., 1990 : Squids, cuttlefish and octopuses. *Mar. Freshw. Behav. Physiol.*, **18**, 1-17.
- Raymond M. and Rousset F., 1995 : An exact test for population differentiation. *Evolution*, **49**, 1280-1283.
- Roff D. A. and Bentzen P., 1989 : The Statistical Analysis of Mitochondrial DNA Polymorphisms: X^2 and the Problem of Small Samples. *Mol. Biol. Evol.*, **6**, 539-545.
- Roper C. F. E. and Voss G. L., 1983 : Guidelines for taxonomic descriptions of cephalopod species. *Mem. Nat. Mus. Victoria*, **44**, 49-63.
- Rozas J., Sanchez-DelBarrio J. C., Messeguer X. and Rozas R., 2003 : DnaSP, DNA polymorphism analyses by the coalescent and other methods. *Bioinformatics*, **19**, 2496-2497.
- Saitou N. and Nei M., 1987 : The neighbor-joining method : a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Mol. Biol. Evol.*, **4**, 406-425.
- 酒井光夫, 2012 : 65アカイカ 北太平洋, 「平成21年度国際資源の現況」(水産庁), 水産庁・水産総合研究センター, 東京, **65**, pp. 1-5.
- Sato K., Mitani Y., Cameron M. F. and Siniff D. B., 2003 : Naito Y. Factors affecting stroking patterns and body angle in diving Weddell seals under natural conditions. *J. Exp. Biol.*, **206**, 1461-1470.
- Shotton R., 2006 : Management of demersal fisheries resources of the southern Indian Ocean. *FAO Fish. Cir.*, **1020**, 1-90.
- Sparre P., Ursin E. and Venema S. C., 1993 : Introduction to tropical fish stock assessment. Part 1 : manual. *FAO Fish Tech. Paper*, **306**, 192-218.
- Staaf D. J., Ruiz-Coolley R. I., Elliger C., Lebaric Z., Campos B., Markaida U. and Gilly W.F., 2010 : Ommastrephid squids *Sthenoteuthis oualaniensis* and *Dosidicus gigas* in the eastern Pacific show convergent biogeographic breaks but contrasting population structures. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **418**, 165-178.
- 水産庁, 1996 : 平成7年度アカイカ好漁場探索調査報告書, 水産庁, 東京, 192pp.
- 水産庁, 1996 : 主要漁業の概要, 水産庁, 東京, pp. 83-91.
- 平 啓介, 1997 : 世界の海流, 「海洋のしくみ」(東京海洋大学研究所編), 日本実業出版, 東京, pp. 62-63.
- Tamura K., Peterson D., Peterson N., Stecher G., Nei M. and Kumar S., 2011 : MEGA 5 : Molecular Evolutionary Genetics Analysis Using Maximum Likelihood, Evolutionary Distance, and Maximum Parsimony Methods. *Mol. Biol. Evol.*, **28**, 2731-2739.
- 田中一郎, 1987 : いか流し網漁業, 「1984~86年北太平洋におけるさけ・ます漁業に関連した海産哺乳類の調査研究 (北太平洋漁業国際委員会提出文書)」(高木健治 編), 遠洋水産研究所・水産庁, 清水, pp. 129.
- Thompson J. D., Higgins D. G. and Gibson T. J., 1994 : CLUSTAL W : improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, positionspecific gap penalties and weight matrix choice. *Nucl. Acids Res.*, **22**, 4673-4680.
- Thompson J. T. and Kier W. M., 2002 : Ontogeny of squid mantle function : changes in the mechanics of escape-jet locomotion in the oval squid, *Sepioteuthis lessoniana* Lesson, 1830. *Biol. Bull.*, **203**, 14-26.
- 東海 正, 1997 : 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, **61**, 288-298.
- 東海 正, 2009 : 曳網漁具の選択性曲線パラメータ最尤推定における適合性の検定について. 水産工学, **46**, 69-80.
- Tsuda Y., Kawabe R., Tanaka H., Mitsunaga Y., Hiraishi T., Yamamoto Y. and Nashimoto K., 2006 : Monitoring the spawning behavior of chum salmon with an acceleration data logger.

Ecol. Freshwater Fish, **15**, 264-274.

上野康弘・酒井光夫, 2010: 日本近海の有力な未利用資源-サンマ・アカイカ-, 「水産学シリーズ163 新しい漁業のデザイン 沖合漁業の問題とその改善」(上野康弘・熊沢泰生・稲田博史 共編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 42-64.

渡部俊広・田中博之・中村好和・松下吉樹・馬場徳寿, 1995: 第3章 高選択性漁獲技術の開発, 「アカイカの高選択性漁獲技術の開発」, 農林水産技術会議事務局, 東京, **301**, 61-73.

Webber D. M. and O'Dor R. K., 1986: Monitoring the metabolic rate and activity of free-swimming squid with telemetered jet pressure. *J. Exp. Biol.*, **126**, 205-224.

Weir B. S. and Cockerham C. C., 1984: Estimating F-statistics for the analysis of population structure. *Evolution*, **38**, 1358-1370.

Wileman D. A., Ferro R. S. T., Fonteyne R. and Millar R. B., 1996: Manual of methods of measuring the selectivity of towed fishing gears. *ICES Coop. Res. Rep.*, **215**, 1-126.

Yada S., Guo H., Toda M. and Nakamura Y., 1997: Mechanisms of squid falling off and preventing dropping out from jig of automatic jigging machine. *La Mer.*, **35**, 23-30.

Yatsu A., 2000: Age estimation of four oceanic

squids, *Ommastrephes bartramii*, *Dosidicus gigas*, *Sthenoteuthis oualaniensis*, and *Illex argentinus* (Cephalopoda, Ommastrephidae) based on statolith microstructure. *Jpn. Agri. Res. Quart.*, **34**, 75-80.

山下秀幸, 2005: 平成16年度海洋水産資源利用合理化開発事業(いか釣)報告(速報)-北太平洋中・東部海域-, 独立行政法人水産総合研究センター, 神奈川, 9pp.

山下秀幸, 2006: 平成16年度海洋水産資源利用合理化開発事業調査報告書(いか釣:北太平洋中・東部海域, 南太平洋西部海域), 独立行政法人水産総合研究センター, 神奈川, 284pp.

山下秀幸・黒坂浩平・越智洋介・小河道生, 2008: アカイカ釣りにおける釣り落としと船体運動との関係. 日水誌, **74**, 697-699.

谷津明彦・田中博之・森 純太, 1998: 北太平洋におけるアカイカ *Ommastrephes bartramii* の資源構造, 「外洋性大型イカ類に関する国際シンポジウム講演集」(奥谷喬司 編), 海洋水産資源開発センター, 東京, pp. 29-46.

谷津明彦・平松一彦・早瀬茂雄, 1994: 日本のいか流し網漁業の概要と混獲について, 「北太平洋漁業国際委員会研究報告」, 北太平洋漁業国際委員会, ヴァンクーヴァー, **53**, pp. 5-19.