

イカ釣り漁業におけるスルメイカの誘集・釣獲過程

Processes of gathering and capturing Japanese common squid in squid jigging fishery

四方崇文（石川県水産総合センター）

Takafumi SHIKATA

近年、燃油価格は世界的に上昇する傾向にあり、地球温暖化対策として二酸化炭素の排出を抑制する必要性も増しており、省エネルギー技術の開発と普及は多くの分野で重要な課題になっている。イカ釣り漁業では発光ダイオード(LED)漁灯の実用化試験が活発に進められているが、その釣獲性能は現用のメタルハライド(MH)漁灯に比べて低い水準に留まっており、一層の性能向上が求められている。しかしながら、スルメイカの誘集や釣獲において灯光がどのように機能しているのか十分には解明されておらず、このことが LED 漁灯の実用化を遅らせる一因になっている。このような現状を受けて、現在、スルメイカの誘集・釣獲過程を解明するための研究を進めている。本稿ではこれまでの研究概要を紹介する。

1. スルメイカを船底下に誘導するメカニズム

船上灯点灯時には、船体周囲の海面下に高照度域（直射域）、船底下に低照度域（陰影部）が形成され、スルメイカは直射域を避けて陰影部によく集まるとされている。漁業者も陰影部の重要性を経験的に認めており、船上灯の配置や釣具ラインの降下位置に注意を払っている。しかし、船上灯光により形成される海面下の光環境がスルメイカの行動や釣獲にどのように作用しているのかという行動制御機能についてはあまり分かっていない。このことを明らかにするには、光環境を意図的に変えてスルメイカの行動を観察する能動的実験が必要である。そこで、船上灯によるイカ釣り操業時に船底下に垂下した水中灯を点灯・消灯して陰影部を消失・出現させ、このときのスルメイカの行動や釣獲尾数の変化を調べた。

1-1. 調査方法

石川県水産総合センターの調査船白山丸(167 トン)には、3kW 型 MH 船上灯 78 灯と自動イカ釣機 14 台が装備されており、600W 型青緑色 LED 水中灯 1 灯を船首に追加装備した(図 1)。2008 年と 2009 年の 8~10 月に日本海沖合で船上灯によるイカ釣り操業を行い、スルメイカが高密度に集群した段階で船底下に垂下した水中灯を点灯・消灯して陰影部を消失・出現させ、このときのスルメイカの行動を魚群探知機(魚探)とソナーで観察した。釣機稼働中には、釣針や錘が魚探に映るので観察時には釣具ラインを巻き上げて釣機を停止した。操業中には 1 時間単位で水中灯を点灯・消灯して釣機 1 台 1 時間当たりの釣獲尾数(CPUE)の変化を調べた。

船上灯点灯時の海中照度については、石川県能登町沖で夜間に白山丸の船上灯を点灯し、船外機船から分光照度計を垂下して測定した。水中灯周囲の照度については、海中に垂下した状態で測定することは技術的に困難であったため、陸上施設内で測定した。即ち、海水を入れた透明樹脂製の円形水槽に水中灯を横向きに懸架し、光反射を抑えるために水槽の底面と壁面および水面に黒のビニールフィルムを張り付け、壁面のビニールフィルムに開けた測定窓に分光照度計を押し当てて水中灯周囲 24

方向の照度を測定した。この値を初期値とし、その光が各方向に拡散と消散によって減衰しながら広がるものとして水中灯周囲の距離別照度を計算した。

1-2. 結果および考察

船上灯点灯時の海中照度と計算で求めた水中灯周囲の照度から照度分布図を作成した(図 2)。船上灯のみ点灯したときの照度は船体中央から 5~10m 付近の表層で最も高く、そこから舷外方向には比較的緩やかに、船底下方向には急激に低下し、船底下に扇状の陰影部が形成されていることが確認された。一方、船底下で水中灯を光量調節値 100%(最大出力)で点灯したときには、水中灯周囲の陰影部が消失するため、水中灯の垂下深度が深くなるほど陰影部が押し下げられ、扇状であった陰影部の形状も損なわれてしまうことが分かった。

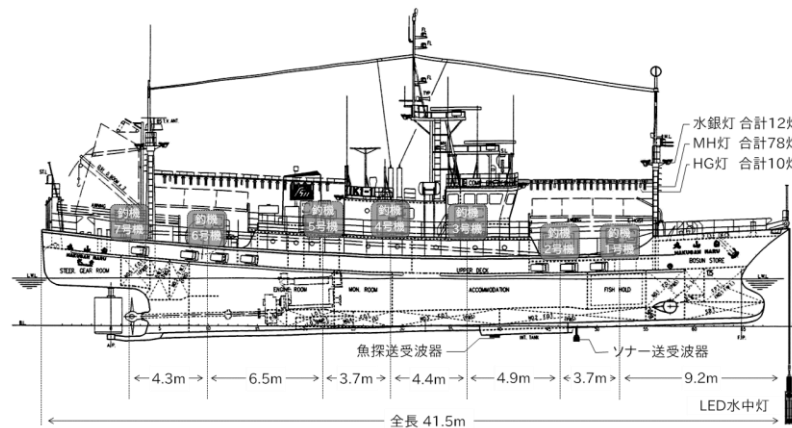


図1 調査船白山丸の釣機と漁灯の配置。船首から船尾に1~7号釣機が番号順に配置されている。

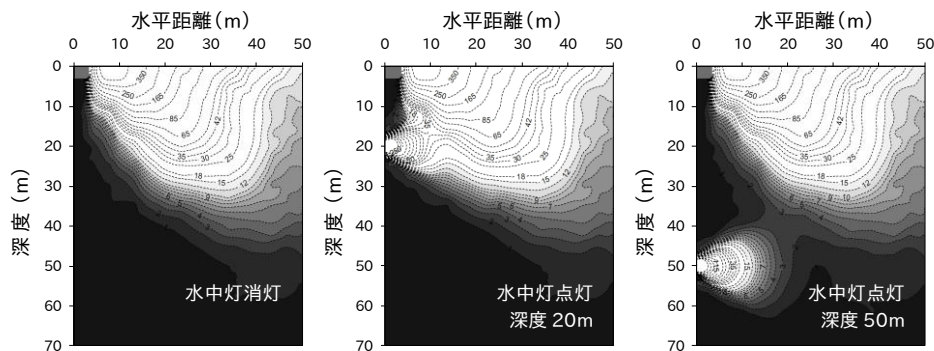


図2 船上灯・LED水中灯点灯時における波長488nm帯の海中照度の舷外方向鉛直断面。照度は分光照度計の出力値で単位のない値。

水中灯点灯時の魚探反応の変化を水中灯の垂下深度を変えて調べた(図 3)。水中灯を深度 20m で点灯(光量調節値 100%)したときには目立った変化はみられなかったが、深度 50m で点灯したときには水中灯の垂下深度付近より上層の反応が直ちに消失し、深度 80m で点灯したときに至ってはほとんど全ての反応が消失した。さらに反応の消失範囲をソナーで調べたところ(図 4)、水中灯を深度 50m で点灯したときは半径 30m・深度 50m 以浅、深度 80m で点灯したときは半径 50m・深度 87m 以浅の範囲に渡って反応が消失したことが分かった。水中灯点灯中には水中灯付近に反応は見られなかったが、消灯すると直ちに水中灯付近に反応が現れることが確認された。水中灯の光量調節値を変えたときの变化も調べたところ、光量調節値を 10%から 30%に上げた段階で魚探反応の消失が認めら

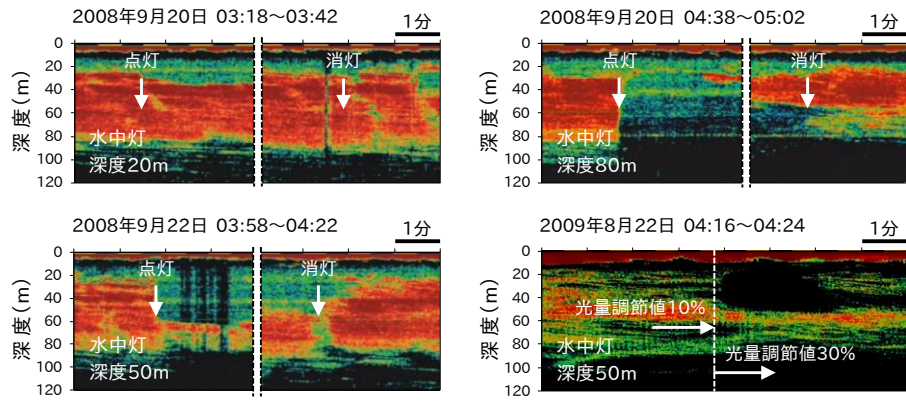


図3 LED水中灯の点灯・消灯と光量調節にともなう魚探反応の変化. 音響観察中には釣機は全て停止した.

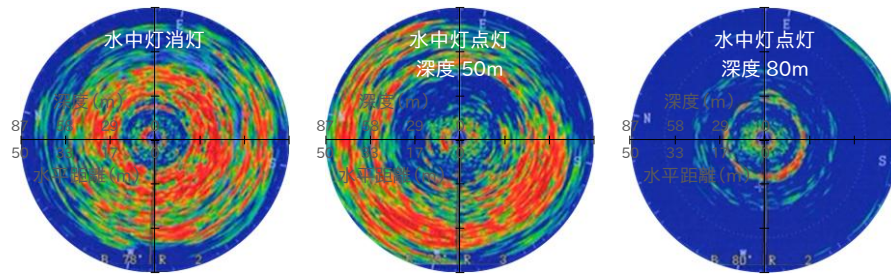


図4 LED水中灯の点灯・消灯にともなうソナー反応の変化. ソナーのレンジは100m, 俯角は60度に設定した.

れた. これらの行動観察とは別に水中灯光が釣獲に及ぼす影響についても調べた. 深度 50m に垂下した水中灯を点灯 (光量調節値 100%)・消灯したところ, CPUE は水中灯を点灯すると有意に低下し, 消灯すると有意に上昇した (図 5).

水中灯点灯時には魚探反応が消失して CPUE は低下し, 加えて水中灯が明るいほど魚探反応の消失は顕著であったことから, スルメイカには明るい環境を避ける性質があり, 船底下陰影部はスルメイカの集群と釣獲に不可欠の要素であることが明らかである. 魚探とソナーによる観察から, 水中灯点灯時には水中灯の垂下深度付近より上層に分布するスルメイカが逃避し, スルメイカは水中灯より深いところに広く分布することが分かった. これは水中灯光によって陰影部が押し下げられ, その形状が損なわれたことにもなう分布変化と考えられる. 実際, 水中灯を点灯した状態から消灯して正常な陰影部を出現させたところ, 水中灯より深いところに広く分布していたスルメイカの一部が陰影部に浮上・集群し, CPUE も直ちに上昇した. これらの結果は, 船上灯光によって形成された船底下陰影部には船体周囲に集めたスルメイカを船底下の釣獲しやすい位置に誘導・集約して, 釣獲に結び付ける機能があることを示している.

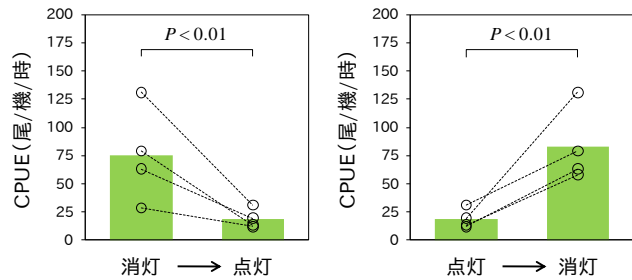


図5 LED水中灯の点灯・消灯にともなうCPUEの変動. 縦棒は平均値. Wilcoxonの符号順位和検定で有意差を調べた.

2. 船体周囲におけるスルメイカの行動特性

前述の調査によって船底下陰影部には船体周囲に集めたスルメイカを船底下の釣獲しやすい位置に誘導・集約する機能があることが明らかになった。しかし、船体周囲のスルメイカがどのような経路をたどって船底下に入るのか明らかでない。そこで、イカ釣り操業時のソナー画像から船体周囲のスルメイカの行動を追跡し、海中照度分布との関連性について検討した。

2-1. 調査方法

調査船白山丸によるイカ釣り操業時のソナーと魚探の画像を連続記録してスルメイカの行動を調べた。記録装置は市販品を組合わせたものであり、ソナーと魚探のアナログ RGB コンポーネント信号をスキャンコンバーターでビデオ信号に変換し、これをビデオキャプチャとパソコンで動画ファイルに変換してハードディスクに保存した。一方、白山丸に装備されている自動イカ釣機には負荷検出機能があり、操作盤に表示される負荷データからスルメイカの釣獲状況が把握できる。操作盤とパソコンを接続する装置を作成し、釣機毎の負荷と錘深度のデータを1秒間隔でパソコンに記録した。

2-2. 結果および考察

これまで記録した画像を確認したところ、好漁時には船体周囲一面に反応がみられるため行動観察が難しく、釣獲尾数が少なくて反応が疎らなほうが観察に適していることが分かった。そこで、操業開始後の CPUE が上昇し始める時間帯に着目したところ、反応が連続的に移動する様子をとらえることができた。ソナー画面上の位置と俯角から反応の水平位置を求めたところ、反応は船体周囲を回るように移動しており、船首側と船尾側で船体に接近することが多かった(図 6)。船体を周回する反応の増加にともなって CPUE が上昇していることから、これらの反応はスルメイカである可能性が高いと考えられた。このことを明らかにするには、反応の移動と釣獲尾数の変化を一連の現象としてとら

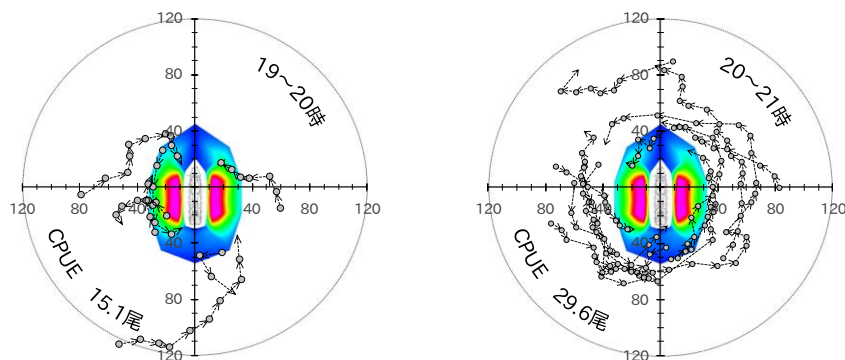


図6 ソナーで観察したスルメイカの群れとみられる反応の15秒毎の水平位置と船上灯点灯時の深度10mにおける波長488nm帯の照度分布。

える必要がある。手作業で釣獲尾数を数える従来の方法では瞬間的な釣獲尾数の増加をとらえることができなかったが、釣機の負荷データから刻々と変化する釣獲状況がモニタリングできるようになった。ソナー・魚探の反応と釣機負荷の変化を比較したところ、スルメイカの群れが船体周囲から船底下に入り、釣獲につながる様子をとらえることができた。その一例は図 7 のとおりであり、左舷斜め前方に出現した反応が船体後方に移動して船尾付近で消滅し、その直後に魚探に反応が現れてスルメイカが多数釣獲された。

以上の結果から、スルメイカは船底下に入る前に船体を周回し、船首尾方向から船底下に入ることが分かった。船上灯点灯時の海中照度は舷外方向で高く船首尾方向で弱いバタフライ型の分布にな

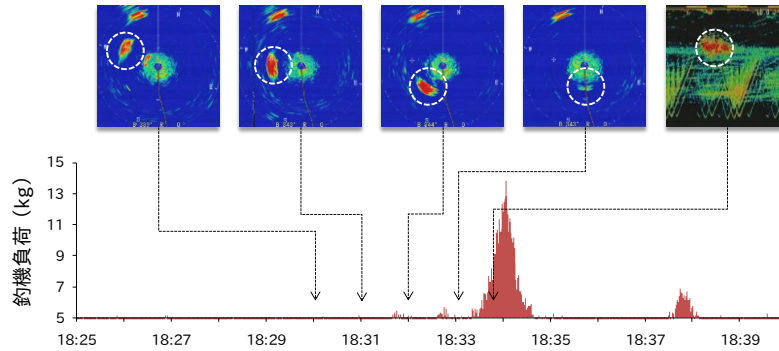


図7 ソナーと魚探で観察したスルメイカの群れの行動と釣機平均負荷の時間系列。釣獲がないときの釣機平均負荷は4.5kgであった。

っている(図 6)。前述のようにスルメイカには明るい環境を避ける性質があることから、スルメイカは舷外方向の高照度域を避けて移動しており、船首尾方向の低照度域が船底下への入り口になっていると考えられた。これ以外の行動パターンがあるかどうかなど、今後も調査する必要がある。

3. イカ釣り漁場におけるスルメイカの対光行動実験

スルメイカの対光行動は主に水層実験で研究されているが、水槽内ではスルメイカの遊泳行動が物理的に制約されるうえ、照度勾配など実際の漁場環境を再現することも不可能である。このため水層実験で観察された行動をそのまま漁場に適用することはできない。前述のように音響機器や釣機の情報でスルメイカの行動がモニタリングできることから、音響機器、釣機、光源をうまく組み合わせることで漁場でも様々な実験が可能と考えられる。ここでは水中光源の明るさと距離がスルメイカ釣獲に及ぼす影響について調べた実験を紹介する。

3-1. 調査方法

漁場で対光行動の実験を行うにはスルメイカを十分に集めておく必要がある。そこで、日本海沖合で白山丸によるイカ釣り操業を行い、スルメイカが船底下に十分集群した段階で水中灯を用いた実験を行った。2010年10月16日の操業途中にスルメイカの分布層の下部となる深度50mにLED水中灯を船首から垂下し(図1)、光量調節値を0%(消灯)・12%・25%・50%・100%へと10分毎に変化させる操作を3回繰り返した。この間にスルメイカを釣獲して釣機の負荷データを記録し、負荷とCPUEの関係式から釣機毎のCPUEを算出した。

3-2. 結果および考察

釣機別光量調節値別にCPUEの変動を調べたところ、水中灯の光量調節値の上昇とともにCPUEは低下し、この低下傾向は水中灯に近い釣機で顕著であった。そこで、水中灯消灯時に対する点灯時のCPUEの割合を求め、水中灯から釣機までの水平距離との関係を調べた(図8)。その結果、光量調節値が25~100%の場合、水中灯と釣機の距離が短いほどCPUEの低下割合が大きかった。光量調節と距離の要素を統合して考察するために、各光量調節値で水中灯を点灯したときの釣機下深度50mの照度の相対値を計算してCPUEとの関係を調べた。釣機下の照度は拡散と消散による減衰を考慮して計算によって求めた。その結果、照度が高いほどCPUEの低下は大きく、低下割合は照度の対数に概ね比例することが分かった(図8)。この結果は物理的な明るさとスルメイカの光感覚の間にウェーバー・フェヒナーの法則が成り立つことを示唆している。水中灯を光量調節値100%で点灯した場合、その光が 10^{-5} ~ 10^{-6} に減衰すれば釣獲尾数は低下しなくなるが(図8)、これには40~60mの距

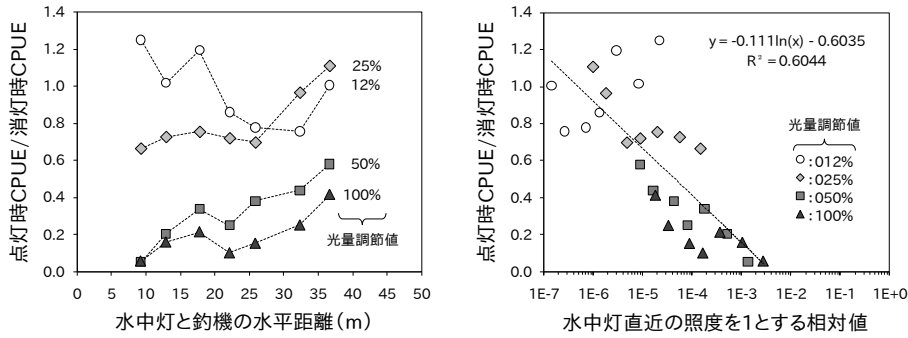


図8 LED水中灯点灯時のCPUEの変化割合。水中灯と釣機の水平距離，並びに水中灯光由来の海中照度の相対値との関係。

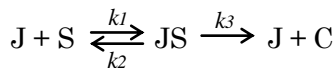
離が必要である。一方，水中灯を光量調節値 100%で点灯した場合には，半径 30～50m の範囲に渡ってスルメイカが逃避することをソナー画像で確認している(図 4)。この逃避距離は釣獲尾数を減少させる距離に概ね一致している。

4. スルメイカの集群密度と釣獲量の関係

イカ釣り漁船の釣機の台数と釣針の個数は有限であるため，スルメイカの集群密度が極めて高い条件下では集群密度と単位時間当たりの釣獲量が比例しなくなると考えられる。また，漁灯により集魚したスルメイカのうちの程度を釣獲しているのかも明らかでない。集群密度と釣獲量の関係を明らかにすることは漁灯の性能を評価したり，効率的な操業方法を考えるうえで重要である。このような観点から，本研究では両者の関係モデルを検討するとともに，操業時におけるスルメイカの集群密度を計量魚探で測定し，単位時間当たりの釣獲量との関係を調べた。

4-1. 集群密度と釣獲量の関係モデル

イカ釣り漁業では，船下に集群したイカ(S)が釣針(J)に食いついて複合体(JS)を形成し，これが船上に引き上げられ，イカと釣針が分離してイカは釣獲物(C)となる。イカが引き上げられる途中に釣針から外れて海に戻ることはあるが，釣獲物となったイカが再び海に戻ることはない。各過程の速度を k とし，釣獲過程をモデルとして表現すると次のようになる。



この釣獲過程は酵素反応と類似しており，集群密度と単位時間当たりの釣獲量の関係は酵素反応の速度式である Michaelis-Menten 式と同様に導くことができる。即ち，イカの釣られやすさ(a)は式 1 で表すことができる。釣針の総数(Jt)は JS と J の和であるから式 2 が成り立つ。両式から J を消去すると式 3 を得ることができる。単位時間当たりの釣獲量(CPUE)は式 4 で表すことができ，式 3 を式 4 に代入することで式 5 を得ることができる。CPUE の最高値は全ての釣針にイカが食いついたとき ($k_3[Jt]$) に得られ，これを b とすることで式 6 が得られる。

$$a = [JS] / [J][S] \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$[Jt] = [JS] + [J] \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$[JS] = [Jt][S] / (1/a + [S]) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$CPUE = k_3[JS] \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$CPUE = k_3[Jt][S] / (1/a + [S]) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$CPUE = b[S] / (1/a + [S]) \quad \dots \dots \dots (6)$$

釣獲過程のモデルから導き出された式 6 ではイカの
 集群密度([S])と CPUE の関係は図 9 のような曲線に
 なる. この曲線から集群密度が低いときは密度に比例し
 て CPUE は上昇するが, 集群密度が非常に高いときは
 密度が上がっても CPUE はあまり上昇しないことが分
 かる. 漁船から海中に降ろされる釣針の数は一定である
 ため, 複合体の増加とともに複合体を形成していない釣
 針の数が減少して実質的な釣獲能力が低下する. このこ
 とが, 集群密度の上昇とともに CPUE の上昇が鈍化す
 る理由である. 釣られやすさが低下すると CPUE が低下するとともに CPUE の上昇が頭打ちになる
 性質も弱まる. この関係式は被捕食者の分布密度と捕食者当たりの捕食量の関係を示した Holling の
 円盤方程式と基本的に同じである.

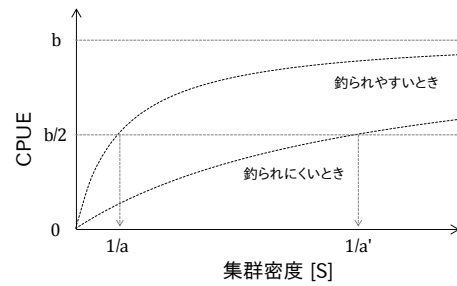


図9 集群密度とCPUEの関係

4-2. 調査方法

2009年と2010年の8~9月に日本海沖合で調査船白山丸によるイカ釣り操業を行った. 夜間にメ
 タルハライド船上灯を点灯し, 釣具ラインに釣針 24 本を連結した釣機 14 台を用いてスルメイカを釣
 獲し, 釣獲尾数を 1 時間単位で計数して CPUE を求めた. 操業途中に釣具ラインを巻き上げ, 計量
 魚探(Simrad 社製 EK60 システム: 70kHz)を用いて船底下の深度 15~70m のスルメイカの集群密度
 を測定した. スルメイカのターゲットストレンジスは *in situ* 法で測定した.

4-3. 結果および考察

合計 21 回の操業で 152 個のデータセットを得た. CPUE の範囲は 0.6~689 尾, 集群密度の範囲
 は 0.0~0.20 尾/m³であった(図 10). 2009年8月の調査では CPUE が極めて高い操業もあり, モデ
 ル式で予想されたとおり, 集群密度に対して CPUE の上昇が頭打ちになる現象がみられた. これに対
 して 2010年9月の調査では集群密度の上昇にともなう CPUE の上昇は緩やかで直線的であった. モ
 デル式から, 釣られやすさ(a)が低下すると CPUE が低下するとともに CPUE の上昇が頭打ちになる
 性質も弱まることが明らかである. つまり, 調査毎に釣られやすさが異なっていたと考えられる. そ
 こで, モデル式を調査データにあてはめて a を求めた. CPUE の最高値(b)については, 釣針数と釣
 具ラインの上下に要する時間から計算上は 1,728 尾になる. しかし, 釣具ラインの上部にある釣針ほ
 ど海中に滞在する時間が短く, 釣針の釣獲に対する寄与度には差があることを考慮すると, 実際の b
 はこの計算値よりも小さい可能性がある. そこで 1995~2010年に白山丸が実施した 626 回の操業で
 得られた最高値(965 尾)を b とした. 年月別に a を求めたところ 2009年8月は 22.6 と高く, 2009
 年9月は 5.9 と低く, 2010年の8月と9月はそれぞれ 1.9 および 1.6 と著しく低かった. 洋上目視で

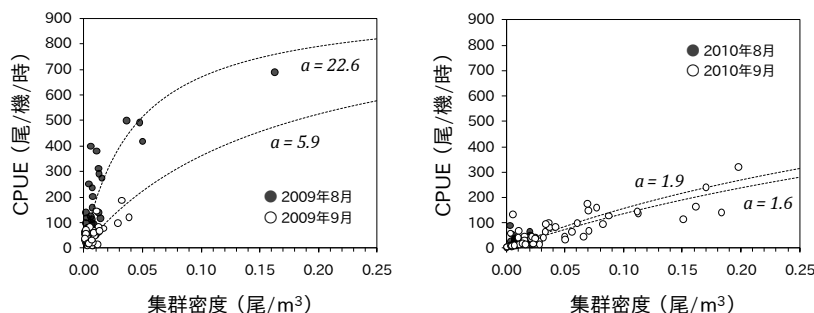


図10 イカ釣り操業時に計量魚探で測定したスルメイカの集群密度とCPUE
 の関係. 点線は年月別のデータに対するモデル式の近似曲線.

はスルメイカが確認できないにもかかわらず好漁であったり、逆に相当数のスルメイカが確認できるにもかかわらず不漁になるなど、釣られやすさが変動することは経験的にも理解できる。釣られやすさを変動させる要因として、月齢や性成熟の影響が考えられるが、このことを解明するには長期間のデータ蓄積が必要である。

スルメイカが釣られやすいときには、集群密度に対して CPUE の上昇が頭打ちになる現象が強く表れ、釣られにくいときには、CPUE が低下して同現象は表れにくくなることが明らかになった。これは集群密度と CPUE の関係モデルで説明可能であり、モデルの妥当性を支持する結果であった。この結果は漁業現場における省エネルギー対策に応用可能と考えられる。即ち、操業開始から時間毎の釣獲量が順調に上昇して極めて好漁となる操業では、実際には CPUE の上昇が頭打ちになっている可能性があるため、漁灯の点灯数を少なくして集群密度が多少低下しても釣獲量はあまり低下しないことになる。一方、魚探に十分な反応がみられるにもかかわらず、釣獲量が伸び悩む操業では、スルメイカが釣られにくい状態にあると考えられるので、釣獲の効率を高める工夫が重要である。漁船では操業終了となる日出の前に MH 灯を消灯してハロゲン灯に切り替える操作が一般的に行われ、このことで釣獲量が増加するとされている。操業終了前にはもはや集魚の必要がないので、これは集魚よりも釣獲に重点をおいた操作と考えられる。このような操作を操業途中に取り入れることで燃油を節減しつつ釣獲の効率を高められる可能性がある。

これまでイカ釣り漁業の漁灯には、白熱灯、ハロゲン灯、MH 灯が用いられてきた。これらの光源はどれもランプ型で全周に光を放射するため、配光制御の要素が少なく、設置方法も基本的には同じでよかった。一方、LED は発光面の前方にしか光を放射しないので、LED 漁灯の設計や設置方法をかえることで自在に配光を制御することができる。しかし、スルメイカを効率的に集めて釣獲するうえでどのような配光が適しているのか明らかでなかったため、配光制御の幅が広いことがかえって LED 漁灯の実用化を難しいものにしてきた。本稿で紹介したように、灯光が海面下に作り出す立体的な明暗環境がスルメイカの誘集・釣獲において重要な役割を果たしている。一方、明暗環境をデザインするという点においては LED 漁灯は従来の漁灯よりも優れた特性を有している。従って、スルメイカの誘集・釣獲過程や対光行動に関する研究を前進させ、漁灯利用の理論的・技術的な基礎を確立することで、LED 漁灯の釣獲性能を MH 漁灯以上に高めることは十分に可能である。

本稿で紹介した研究の一部は、新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「LED 漁灯と超音波測器によるイカ群の行動制御と釣獲技術の構築(課題番号:2055)」,並びに「イカ釣り漁業における LED 漁灯の応用による効率的生産技術の開発(課題番号:21059)」により実施したものである。「スルメイカを船底下に誘導するメカニズム」で紹介した内容は、東京海洋大学の稲田博史先生、古野電気株式会社の三浦郁男氏、拓洋理研株式会社の臺田望氏との共同研究成果である。「船体周囲におけるスルメイカの行動特性」と「イカ釣り漁場におけるスルメイカの対光行動実験」に用いた釣機負荷記録装置は、株式会社東和電機製作所の三木智宏氏に作成して頂いたものであり、負荷データを検証するうえで独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所の高山剛氏のビデオ観察の結果が役立った。「スルメイカの集群密度と釣獲量の関係」で紹介した内容は、水産工学研究所の高尾芳三氏と貞安一廣氏(現所属:独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター)の協力を得て研究を進めているものである。水産工学研究所の渡部俊広氏には、事業総括者として研究推進に配慮頂いている。その他 LED 漁灯の試験研究に関わっている漁業者、研究者、メーカー担当者、行政担当者のみなさんとの情報交換が考えを整理するうえで有益であった。これらの方々に感謝の意を表す。