

東シナ海産クロエソ *Saurida umeyoshii* および対馬海峡産トカゲエソ *Saurida elongata* の資源生物学的研究

酒井 猛 (西海区水産研究所)

クロエソ, トカゲエソを含むエソ類は我が国各地の沿岸, 東シナ海等で漁獲され, 高級練り製品の原料となる水産重要種である。しかしながら, 我が国周辺のエソ類についてはかつて分類学的混乱があり, 資源管理に必要な生物学的知見の整備は立ち後れていた。本研究では, 分類学的にマエソと混同されていたクロエソ, コウカイトカゲエソと混同されていたトカゲエソの2種について年齢, 成長および成熟, 産卵に関する資源生物学的特性を解明した。

第1章: 1998年4月から2000年4月に東シナ海で漁獲されたクロエソ計1,052個体を用いた。耳石最外縁部における透明帯の出現率および縁辺成長率の月別変化から, 標示は年1回, 12~3月に形成されると考えられた。

雌雄の成長式は次式により示された。

$$\text{雄: } FL_t = 421.7 (1 - e^{-0.162(t+1.24)}) \quad (1 \leq t \leq 8)$$

$$\text{雌: } FL_t = 489.4 (1 - e^{-0.160(t+0.95)}) \quad (1 \leq t \leq 10)$$

これらの成長推定結果より, 雌は雄に比べ寿命が長く, 成長も良いと考えられた。寿命は, 雄で8歳, 雌で10歳程度と考えられた。また, 過去に行われた鱗によるエソ類の年齢査定は年齢を過小評価していた可能性が示唆された。

第2章: 1998年4月から2000年4月にかけて東シナ海で漁獲されたクロエソ計1,052個体を用いた。組織学的観察に基づき, 卵巣の成熟段階を未成熟期, 発達期, 成熟期, 産卵期, 閉鎖期, 休止期の6期に区分した。成熟期あるいは産卵期の卵巣を持った個体は4~12月で認められ, 特に6~9月にかけて高い頻度で出現した。雌のGSIは6~9月にかけて高く, 8月には最大値を示した。雄では6月に最大値を示した。これらのことから, 本種の産卵期間は6~9月を盛期として, 4~12月の長期にわたると考えられた。最小成熟尾叉長は雄180 mm, 雌228 mmであった。時間帯別の卵径組成および卵巣の組織観察より, 本種では産卵直前に卵径600~700 μm の卵黄形成後期から胚胞移動前期の卵で構成されるピークが形成され, そのピークからいくつかの分離卵群が形成されるという産卵様式を持つと考えられた。さらに, この分離卵群は早い間隔で成熟, 排卵が進行していき, クロエソは一度産卵が始まると数日間連続して産卵することが示唆された。また, この一連の産卵が終わると, 卵黄形成後期の卵が発達することによって再び卵径600~700 μm

のピークが形成され, 同様に一連の産卵を繰り返すと考えられた。バッチ産卵数(BF粒)と尾叉長の関係は,

$$BF = 1.70 \times 10^{-8} FL^{4.88} \quad (r^2 = 0.49)$$

で示された。

第3章: 1999年5月から2001年6月にかけて対馬海峡周辺海域で漁獲されたトカゲエソ計695個体を用いた。鱗と耳石で輪紋の読み取り精度を比較した結果, 鱗の輪紋数は耳石に比べ著しく少なく, 鱗による年齢査定は年齢を過小評価すると考えられた。また耳石による読み取り精度が鱗による精度を上回った。耳石最外縁部における透明帯の出現率および縁辺成長率の月別変化から, 標示は年1回, 11~2月に形成されると考えられた。

雌雄の成長式は次式により示された。

$$\text{雄: } FL_t = 422.3 (1 - e^{-0.202(t+1.30)}) \quad (1 \leq t \leq 10)$$

$$\text{雌: } FL_t = 512.6 (1 - e^{-0.157(t+1.45)}) \quad (1 \leq t \leq 11)$$

これらの成長推定結果より, 雌は雄に比べ成長も良いと考えられた。寿命は, 雄で10歳, 雌で11歳程度と考えられた。また, 過去に行われた鱗によるエソ類の年齢査定は年齢を過小評価していた可能性が示唆された。

第4章: 1999年5月から2001年6月にかけて対馬海峡周辺海域で漁獲されたトカゲエソ計695個体を用いた。組織学的観察に基づき, 卵巣の成熟段階を未成熟期, 発達期, 成熟期, 産卵期, 閉鎖期, 休止期の6期に区分した。成熟期あるいは産卵期の卵巣を持った個体は5~8月で認められ, 特に5, 6月に高い頻度で出現した。雌のGSIは4~8月にかけて高く, 5月には最大値を示した。雄でも5月に最大値を示した。これらのことから, 本種の産卵期間は5, 6月を盛期として, 5~8月にわたると考えられた。最小成熟尾叉長は雄235 mm, 雌249 mmであった。バッチ産卵数(BF粒)と尾叉長の関係は,

$$BF = 0.00161 FL^{2.98} \quad (r^2 = 0.73)$$

で示された。

No. 28, 1-45 (2009)

イルカのソーナー能力の魚群探知機への適用に関する研究

今泉智人 (水産工学研究所)

水産資源の持続的管理・利用が求められており, そのための水産資源調査に計量魚群探知機を用いた音響資源量調査が現在広く行われている。音響を用いた資源量調査は, 広範囲の資源量を直接迅速に推定できる強力な方法である。しかし, 未だ音響手法のみで魚種

を識別することが難しいこと、自然状態の魚の反射強度などの基礎情報の計測において、疎な分布にしか適用できないことなど、問題点も残されている。一方で、イルカは、エコーロケーションと呼ばれるソーナー能力を有しており、自身の発した超音波を利用して、対象までの距離、対象の大きさ、材質などの情報を得ている。イルカの主な対象も魚であることから、このようなイルカのソーナー能力を人工のソーナーに応用することが出来れば、音響を用いた資源量調査や水産用音響機器の大幅なレベルアップが期待される。

そこで、本研究では、イルカのソーナー能力を魚群探知機に適用することを目的として、研究を行った。特に本研究では、イルカのソーナー音の短パルスかつ広帯域という特長に焦点を当て、そのソーナー音を送受して、対象に固有の反射（反射強度）の周波数特性（TS スペクトル）を計測できるようにし、魚種識別や行動推定に道を開く。

まず、イルカのソーナー音を用いた TS スペクトルの計測システムを構築し、反射波と入射波のスペクトルの比で TS スペクトルを求める計測方法（スペクトル比法）を、反射特性明確な金属球により検証した。金属球の散乱特性は、理論計算により求めることができ、戻り反射に指向性がないので都合が良い。水槽において金属球の広帯域での散乱特性を計測し、この理論値と比較し、よく一致することを確認した。したがって、以降、広帯域で正確な魚の散乱特性の測定が、構築したシステムとスペクトル比法を用いて実現できる。

次に、麻酔をかけたマアジ、マダイ、マサバの背方向の TS スペクトルを、イルカのソーナー音を用いて水槽で測定した。また1尾のマダイの姿勢角を変化させ、TS スペクトルの測定を行った。その結果、魚の TS スペクトルは、魚種、姿勢角、個体によりかなり大きく異なるが、その値は既往の研究と同じ傾向であった。

次に、海上で自然状態に近い魚の TS スペクトルを測定した。海では送受波器と対象の魚の位置関係が確認できないため、送受波器の指向性の影響を受け、正確な TS スペクトルを得ることは難しい。そこで、金属球を魚の近傍に吊るしそのエコーで指向性関数の補正を行った。その結果、活発に泳いでいるイサキの姿勢角変化による TS スペクトルの変動を計測できた。このような姿勢変動を含んだ TS スペクトルの連続的な測定が、魚種推定のための情報量増加に資すると考えられる。また、イルカのパルス幅が短い広帯域の音波を用いることで、高い距離分解能を実現することができ、自然状態の魚の群れを分解して、単体の集まり

として認識できた。

海上実験で問題となった指向性関数補正のために、広帯域の音波を送受信可能なスプリットビーム（以下 SB）方式を採用したシステム（広帯域 SB システム）を試作した。SB 方式では、受波器を分割して、対象からの反射波の到達時間差を用いて、送受波器から見た相対的な対象の方位と位置を測定できる。広帯域の音波を用いる SB 方式は初めての試みであるので、対象からの時間差検出方法をシミュレーションにより検討し、時間差検出法を相互相関方式に決定した。次に、広帯域での指向性関数補正のために、指向性関数モデルを作成し、実際に測定した指向性関数と比較した結果、両者が良く一致したことから、モデルを利用することとした。次に、広帯域 SB システムの性能を確認するため、金属球と送受波器との相対位置を変化させ、金属球の散乱特性を測定したところ、理論値と実測値が良く一致した。最後に、この広帯域 SB システムを用いて海上実験を行い、高い距離分解能を有したまま、自然状態の魚の TS スペクトルを測定することに成功した。

イルカのソーナー音の他のメリットを探るために、ほぼ同じパルス幅の短バースト波との比較実験を行った。イルカのソーナー音と短バースト波の両者による金属球の反射波に対して、それぞれの入射波を参照波として相互相関処理を行った。その結果、両者で 10 dB 程度信号対雑音比が向上し、またイルカのソーナー音の方が最大で 9 dB 高い信号対雑音比を得られた。一般に広帯域信号は雑音に弱い、イルカのような広帯域のソーナー音を用いれば、広帯域信号の弱点を補えることが示唆された。

以上、本研究により、高い距離分解能を有した状態で、広帯域で対象の TS スペクトルが正確に測定可能な、方法とシステムを開発できた。自然状態の魚の行動や姿勢変化を含んだ TS スペクトルの変化は、魚種識別、行動推定、サイズ推定などのための有用な情報である。イルカのような時間的に短く広帯域の音波を用いることで、音響資源量調査の大きな問題点の1つである個々の魚のエコーの測定条件の緩和を実現し、また、TS スペクトルという魚種識別などのための基礎情報増加を実現した。以上により、本研究は、音響を用いた資源量調査方法の発展に大きく寄与した。

魚類の聴性誘発反応に関する基礎的研究

須賀友大（水産工学研究所）

魚類の聴覚閾値を計測する方法には心電図導出による刺激時の心拍間隔の伸長を指標とした方法（以下、心電図法）がよく使われてきたが、近年では人間でも実用化されている聴性誘発反応を測定する方法（以下、聴性誘発反応法）が使われるようになってきている。Kenyonら（1998）は聴性誘発反応法と心電図法等で求めた聴覚閾値曲線の測定から聴性誘発反応法では手術を必要とせず、短時間で計測できる等の長所を示している。

本研究では魚類の聴覚閾値の計測法を発展させるために次の3つの課題、(1)スピーカ対向法による実験に近距離効果の影響が含まれているか、(2)聴性誘発反応波形の発生器官は何か、(3)魚体を完全に水中に置いた状態で聴性誘発反応が測定可能か、についての実験を行った。さらに水産有用魚種のイカナゴの聴覚閾値の測定とマイワシの超音波に対する応答を計測し、聴性誘発反応法の有用性について検討した。本研究では従来の電極接触部位のみを空中において測定する聴性誘発反応法を空中電極固定法と呼び、電極部分まですべて水中に沈めた状態で測定する方法を水中電極固定法と呼ぶことにする。

【実験方法】

近距離効果の影響 実験にはマコガレイ *Pleuronectes yokohamae* 10尾を使用した。実験は音圧のみが供試魚に刺激として与えられるように魚体全部を空中に保定して実験を行った。刺激はスピーカ対向法により放音し、閾値の測定には心電図法を用いた。刺激音は63 Hz, 100 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 1000 Hzの周波数を使用した。放音の感知の判定は、放音前の30拍の間隔と放音時の間隔でMann WhitneyのU検定を行い、音刺激により心拍間隔が有意に伸びたことを指標とした。

聴性誘発反応の発生器官 実験は空中電極固定法で行った。聴覚特性を詳細に調べられているキンギョ *Carassius auratus* を使用した。供試魚は頭部を除いてネオプレンゴムで包み、プラスチックのクリップで留め、クランプを使って保定した。反応導出電極にはテフロンコーティングされた直径0.1 mmのタンダステンを使った。関電極は中脳中心部の頭部表皮から内部へ0.5 mm挿入し、不関電極は関電極の5 mm前方へ同様に挿入した。反応は生体電気アンプで増幅し、同じ音刺激に対する反応を300回加算平均してオシロスコープに記録した。刺激音は音波形を編集して出力できるソフトを使って作成し、オーディオアンプで増

幅し、反応波形から刺激音波形の影響を除去するために放音毎に位相を反転させ、空中スピーカから断続的に放音した。供試魚の位置での音圧はイドロホンで測定した波形の振幅から求めた。刺激音は1 kHzで持続時間を変化させた音を使用した。

水中電極固定法 水中電極固定法では電極と電極に繋がれたコードの水没する部分を絶縁、防水する必要がある。そこで絶縁、防水できる自己融着テープを使って電極とコードの水没する部分を巻いた。さらにテープの隙間からの水の侵入を防ぐため、カシューを塗付した。電極は頭部に挿入してから生体接着剤を使って接着した。電極以外の実験方法は空中電極固定法と同様に行った。供試魚は各方法で同一個体を使用し、2つの実験法による比較が行えるようにした。刺激音は250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHzを使用した。**イカナゴとマイワシの聴覚特性** 空中電極固定法を使用して実験を行った。イカナゴ *Ammodytes personatus* 13尾、マイワシ *Sardinops melanostictus* 8尾を使用した。イカナゴでは刺激音として128 Hz, 181 Hz, 256 Hz, 362 Hz, 512 Hz、マイワシでは40 kHz, 60 kHz, 80 kHz, 100 kHzと1.024 kHzの音を使った。刺激音の感知の判定は反応の振幅と波形の特徴から判断した。聴覚閾値は反応が観察できた時の最も小さい音圧とした。

【実験結果および考察】

心電図法で魚体を水中に置いた場合のマコガレイの聴覚閾値（Zhang, 1998）と本研究で魚体を空中において聴覚閾値を比較すると160 Hz以下では本研究の値が高くなっている。魚体を水中においたスピーカ対向法では水粒子変位（近距離効果）を完全に抑えることができずに内耳と側線器が応答して聴覚閾値が低くなることがわかった。したがって音圧（遠距離効果）についての聴覚閾値を測定するためには実験方法を改良する必要があることがわかった。

聴性誘発反応発生器官の確認実験では各刺激音の持続時間とそれに対応した反応持続時間には正の相関があった。この特徴は内耳の小囊から直接導出されるマイクロホン電位等と同様であり、キンギョの聴性誘発反応は内耳の小囊、通囊や壺囊等の器官に由来して発生した反応電位が間接的に頭部表皮から記録されると考えられる。

水中電極固定法を試みた実験では反応開始から負のピークまでと、負のピークから正のピークまでの時間、振幅の絶対値はいずれも空中電極固定法と有意差はなかった。電気ノイズの最大振幅と反応波形の最大振幅との比（S/N比）に関しても同一刺激音に対する反応波形で有意差はなかった。聴覚閾値でも計測した周

波数で有意差はなかった。したがって防水処理を十分に行うことで魚体が水中にある場合でも聴性誘発反応を計測し、聴覚閾値を求めることが可能であることがわかった。

イカナゴで128~362 Hz で得られた聴性誘発反応波形はFFTの結果から刺激音周波数の約2倍の周波数成分を持ち、基線が振動する特徴があった。聴覚閾値は128 ~256 Hz の範囲で低くなり、113~118 dBであった。漁船から100 m離れた距離で騒音は100 ~500 Hzで127 ~146 dBであり、マスキング現象を考慮しても騒音を感知していると考えられる。マイワシの超音波への反応波形は先行研究での超音波が聴こえる魚種のような、下に凸のV字型の特徴は見られず、反応らしき波形振幅も見られなかった。マイワシは本研究で用いた超音波を音圧180~190 dBの範囲で感知しないと考えられる。マイワシの超音波に対する聴覚特性はこれまで計測されたことはなく、本研究の結果では超音波を感知していないと考えられたが、他のニシン科の魚類についても調査し、資源量調査に使用されている魚群探知器の周波数との関連についても明らかにする必要がある。

聴性誘発反応法は短時間で実験を終わらせる必要のあるマイワシのような魚種、さらに電極を接触させることで手術なしに聴覚閾値が測定できることからイカナゴの様な小型魚でも有効な方法であることがわかる。

魚類の生棲する環境には様々な音が存在しており聴覚閾値の最も低い周波数とその魚類にとってどの様な利点があるのか、どの様な周波数を人間が利用可能か等、解明すべき点は多くある。このためには幼稚魚からマグロ等の高速遊泳魚まで広い範囲の魚種の聴覚特性の計測が必要であり、聴性誘発反応法は現在用いられている方法では最適である。したがって、電極の材質、寸法、取り付け方法を改善するとともに閾値判定をより客観的に判定できるシステムを確立することが必要となる。

