北海道東部太平洋域におけるトドハダカ *Diaphus theta* の 音響生物量推定

安間 洋樹,^{1*} 大島 達樹,² 本田 聡,³ 宮下 和士,¹ 青木 一郎⁴

(2009 年 11 月 24 日受付, 2010 年 1 月 22 日受理)

¹北海道大学北方生物圏フィールド科学センター, ²水産総合研究センター開発調査センター,

³水産総合研究センター中央水産研究所, ⁴東京大学大学院農学生命科学研究科

Acoustic biomass estimate of California headlightfish *Diaphus theta*,
off eastern Hokkaido, Japan

HIROKI YASUMA,^{1*} TATSUKI OHSHIMA,² SATOSHI HONDA,³
KAZUSHI MIYASHITA¹ AND ICHIRO AOKI⁴

¹Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, ²Marine Fisheries Research and Development Center, Fisheries Research Agency, Yokohama, Kanagawa 220-6115, ³National Research Institute of Fisheries Science, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-8608, ⁴Graduate school of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

California headlightfish *Diaphus theta* is the most abundant mesopelagic fish in the subarctic Pacific. Day- and nighttime field acoustic data and biological samples were obtained in January 2000, in the Pacific area off eastern Hokkaido to estimate fish density and total biomass of *D. theta*. Sound scattering layers composed mainly of immature *D. theta* (63 mm length on average) were widely distributed around the shelf edge (>300 m water depth). Relatively dense schools were observed below the depth of 250 m during the daytime, although the schools were scattered widely above 50 m depth during the nighttime. Fish density was estimated to be 17.3 g/m² on average, which was more than several times higher than that estimated by conventional methods such as net sampling gears. Total biomass in the survey area (2,083 km²) was estimated to be about 35,900 t.

キーワード：計量魚群探知機，道東太平洋，トドハダカ，バイオマス，分布密度

納沙布岬沖から襟裳岬沖にかけた北海道東部太平洋海域（以下，道東太平洋海域）は，親潮系水の流入による高い生物生産性を有し，わが国でも有数の漁場として知られている。水深 300 m 以浅の陸棚から陸棚斜面は，スケトウダラ *Theragra chalcogramma* 太平洋系群の主要成育場として知られているほか，カタクチイワシ *Engraulis japonicus* やスルメイカ *Todarodes pacificus* といった季節的回遊生物の索餌場としても重要である。また，300 m 以深の陸棚斜面より沖では，イトヒキダラ *Laemonema longipes* やキチジ *Sebastes macrochir* といった底魚類が多く生息する。このような漁場，成育場としての重要性を背景に，本海域では様々な魚種を対象とした分布密度や資源量の推定が行われている。¹⁾

このような定量的研究の多くは特定の有用種を対象とし，TAC (Total Allowable Catch) や ABC (Allowable Biological Catch) の算定など，種毎の資源管理を目的として行われてきた。^{2,3)} 一方，これらの研究結果の多くにおいて，他種生物との相互作用や物理環境の変化に応じた資源の変動が示唆されており，近年では，ある生物種を一つの生態系構成要素として捉え，種内・種間での競争関係や物質循環を考慮して資源または漁場を統合的に管理する「Ecosystem-Based Fishery Management⁴⁾」の重要性も多く論じられている。このような生態系ベースのアプローチには多くのデータが必要となるが，特に，海洋で膨大な生物量を有する動物プランクトンと魚類マイクロネクトンの定量的情報は海洋生態系を理解す

Fig. 1 California headlightfish *Diaphus theta*.

るうえで重要であると考えられている。⁵⁾

この二つの生物群のうち、道東太平洋海域においては、大型のカイアシ類 *Neocalanus spp.* とツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* が最も優占的な動物プランクトンで、ハダカイワシ科に属するトドハダカ *Diaphus theta* (Fig. 1) が最も優占的な魚類マイクロネクトンである。^{5,6)} これらの生物は特に陸棚斜面域に多く分布し、陸棚域と沖合域の栄養循環に寄与するほか、日周鉛直移動を介して表層と中深層の栄養循環にも重要な役割を果たす。⁵⁾

以上のような理由から、動物プランクトンでは定量採集のための様々な器具が開発され、道東太平洋海域においても、カイアシ類やツノナシオキアミに関する多くの定量的知見が得られている。^{5,7)} 一方、回避能力の高い魚類マイクロネクトンを正確に定量評価できる採集具は現在のところ存在せず、本海域のトドハダカにおいても、分布密度やバイオマスに関する知見は皆無に等しい。このような背景のもと、本種の空間的分布構造の定量化を可能とするうえで最も期待されているのが、計量魚群探知機（以下、計量魚探）を用いる音響学的手法の適用である。

音響調査では、計量魚探で得られたエコーデータを分布密度に変換するためのスケールファクタとして、生物一個体の反射強度であるターゲットストレングス (TS) が必要となる。⁸⁾ しかし、ハダカイワシ科魚類は生息深度が深いことや濃密な魚群を形成することから TS の海上計測が困難であり、音響手法による定量推定もほとんど行われていない。これに対し安間,⁹⁾ および安間ら¹⁰⁾ は、鰭形状をもとにした理論計算と水槽実験により、トドハダカを含む日本周辺の優占的なハダカイワシ科魚種の TS-体長関係を明らかにし、音響手法による定量化の可能性を示した。

そこで本論文では、道東太平洋海域で得られた音響データを用い、トドハダカの水平的・鉛直的な分布様式、特に本海域の生態系構造を考えるうえで最も基礎的な情報となる分布密度とバイオマスを報告することを目的とした。

Fig. 2 Survey area and acoustic transects, off the Pacific coast of eastern Hokkaido, Japan. Trawl sampling points deeper than 300 m are indicated by arrows.

試料および方法

音響データと魚類サンプルの収集 データの収集は、水産庁が海洋水産資源開発センター（現、独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター）に委託して実施した事業「我が国周辺漁業資源調査（スケトウダラ現存量調査）」において、第三開洋丸（473 t）を使用して行った。調査期間は2000年1月5日から30日である。この間、Fig. 2に示した道東太平洋海域において、水深50 mの沿岸域から大陸棚斜面の水深500 mまでの沖合域をカバーするように、8マイル間隔の平行調査定線を計19本設定した（定線Hは、設置漁具により水深200 mまでに制限）。

音響データの収録には計量魚探EK-500（SIMRAD社製）を用いた。使用周波数は38 kHzで、パルス幅は1.0 msに設定した。計量魚探の較正は古澤ら¹¹⁾に従い、調査初日に60 mmの銅製標準球を用いて行った。調査中は船速8~10 ktで航走し、各定線で昼と夜の2回、音響データを収録した。日の出と日没の前後1時間はデータ収録を行わないようにするため、日中の時間帯を7:50~15:00、夜間の時間帯を17:00~5:50と設定した。

エコーグラム上に現れた魚群の構成種とサイズの組成を確認するため、日中、計23点で網口の高さ約26 m、コッドエンドの目合60 mm（内張り10 mm）の中層トロール（JAMARC98型）を用いた生物採集を行った（Fig. 2）。これらのうち、19点では陸棚斜面の水深270 m以浅の海域に現れる魚群を対象に曳網を行い、4点で

は、水深 300 m 以深に現れる音響散乱層（以下、散乱層）を対象に曳網を行った。これらの 4 点は北東部（G-4）、中央部（M-3）、南西部（P-4, P-5）に大別される（Fig. 2）。トロールの曳網（曳網速度 2.3~4.0 kt）は、等深線に対して平行方向に行い、曳網中は音響データの収録を停止し、定線復帰後に再収録を行った。各点で得られた採集物は、魚種ごとに総重量を計量した後、サブサンプルを 10% ホルマリンで保存し、体長組成等の解析に用いた。

音響データの解析とバイオマスの推定 音響データの解析には、解析ソフト Echoview Ver. 2.20 (Sonar Data 社) を用いた。生物採集で得た情報を基に、解析画面上でトドハダカによる反応を選択し、移動距離 0.1 マイル間隔で平均化した体積後方散乱強度 S_V (dB) を出力した。反応の選択および出力においては、動物プランクトン等の微小生物によるエコーの影響を少なくするため、安間⁹⁾を参考に、 S_V のスレッシュホールドを -80 dB に設定した。分布密度、およびバイオマスの推定においては、 S_V の線形値である体積後方散乱係数 s_v を深度方向に積分し、体積後方散乱係数 s_a に変換して解析を行った。 S_V , s_v , s_a は以下の関係で示される。

$$S_V = 10 s_v / 10 \quad (1)$$

$$s_a = \int_{z_2}^{z_1} s_v(z) dz \quad (2)$$

ここで、 z_1 および z_2 は積分層の上限と下限の深度 (m) を表し、解析画面上で選択した魚群に応じ、Echoview で自動的に検出される。ここで得られた 0.1 マイル間隔の s_a 値を用い、高尾¹²⁾ 及び Williamson¹³⁾ を参考に、以下の手順により調査海域のバイオマス、および s_a (もしくはバイオマス) の変動係数を算出した。

まず、調査定線 i で得られた 0.1 マイル間隔の s_a から、定線ごとの平均値 s_{a_i} を求める。これらの平均値を定線長で重み付けした後に平均化し、調査海域全体の平均値 $s_{a_{ave}}$ を求める。ここで、 $s_{a_{ave}}$ の分散 $\text{var}(s_{a_{ave}})$ は、定線数を t 、定線 i におけるデータ数を n_i として、以下の式で求められる。

$$\text{var}(s_{a_{ave}}) = \frac{t}{t-1} \frac{\sum n_i^2 (s_{a_i} - s_{a_{ave}})^2}{(\sum n_i)^2} \quad (3)$$

$s_{a_{ave}}$ の変動係数 cv は、次式で与えられる。

$$cv = \frac{\sqrt{\text{var}(s_{a_{ave}})}}{s_{a_{ave}}} \quad (4)$$

また、調査海域における平均尾数密度 d (ind./m²) は $s_{a_{ave}}$ を対象魚の音響散乱断面積 σ_{bs} で割ることにより得られる。

$$d = \frac{s_{a_{ave}}}{\sigma_{bs}} \quad (5)$$

ここで使用する σ_{bs} は安間ら¹⁰⁾ によるトドハダカの TS-体長関係式により得た。

$$TS(\text{dB}) = 18.5 \log L - 71.7 \quad (6)$$

ここで L は対象魚の標準体長 (cm) を示し、トロールによる採集物からその平均値をあてはめた。 σ_{bs} と TS には以下の関係がある。

$$\sigma_{bs} = 10^{TS/10} \quad (7)$$

式 (5) で得られた平均尾数密度に調査海域全体の面積を乗ずると、海域全体の尾数が求まる。さらに採集物の平均重量を乗ずれば、調査海域全体のバイオマスが求められる。

結 果

昼夜に得られたエコーグラムの例を Fig. 3 に示す。すべての定線において、マイクロネクトンにより形成される散乱層（図中 MF）は、陸棚縁辺付近の水深が 300 m を越えた海域で現れ始めた。日中のエコーグラムにおいて、散乱層は S_V 値が -60 から -70 dB 程度の比較的弱い反応で構成されていたが、深度 250 m 以深で明瞭な帯状を呈していた。また、この帯状反応の底辺は、海底から十数メートル、もしくは数十メートル離れ、海底付近に現れる底魚による音響反応（図中 DF）とは容易に区別ができた。しかし、水深 300 m 付近においては散乱層がより海底に近づくため、底魚の反応との判別が困難になる箇所も確認された（Fig. 3(a)）。

一方夜間のエコーグラムにおいては、散乱層の底辺は日中とほぼ同深度に見られたが、日中に比べて散乱層が鉛直的に大きく分散し、上端は 50 m 以浅の表層域にまで達していた。また、散乱層の密度は日中に比べて大幅に低く、 S_V 値が -80 dB を下回るところも見られ、明確な魚群の選別は困難となった。しかし、日中において散乱層との判別が困難であった水深 300 m 付近の底魚の反応は、夜間においても比較的濃密な魚群を維持しており、散乱層との区別がしやすくなった（Fig. 3(b)）。以上の結果から、本論文における分布密度とバイオマスの推定は、日中のデータのみを用いて行うこととし、夜間のデータは底魚反応との混合を推定するための補足情報として使用した。

トロール採集を行った計 23 点のうち、水深が 270 m 以浅の 19 点においては、トドハダカは採集されなかった。これらの点では、中層、海底曳きの両方でスケトウダラの親魚が優占し、全重量の 90% 以上を占めていた。²⁾ 一方、水深 300 m 以深の海域で行われた 4 点（Fig. 2, Table 1）においては、全ての点でトドハダカが採集された。これらのうち、P-4 を除く 3 点での曳網は、エコーグラムで確認された散乱層のみが含まれるように網深度を調整したが、P-4 においては数分間着定曳網をした後、散乱層に深度を合わせた。散乱層のみを対象とした 3 点においては、トドハダカが優占的に採集され、全重量の 90% 以上を占めていた。この他の生物

Fig. 3 Typical echograms (on the Line-M) obtained during day time (a) and night times (b). “MF” and “DF” indicate scattering layers of mesopelagic fishes and demersal fishes, respectively.

Table 1 Sampling data of four trawl points in which *Diaphus theta* were caught

Trawl No.	Location		Water depth	Max. net depth	Ship speed	Duration	Total weight of <i>D. theta</i>	Weight ratio in total catch	Other major species
	Lat.	Lon.							
G-4	42°41.00N	144°54.03E	372.0(m)	310.6(m)	2.3(kt)	35(min.)	22.0(kg)	94.5(%)	—
M-3	42°25.78N	143°52.55E	357.0	312.1	2.6	33	7.3	90.3	—
P-4	41°55.35N	143°40.41E	307.8	303.4	2.9	45	8.0	11.7	<i>Laemonema longipes</i>
P-5	41°55.73N	143°41.34E	337.2	305.2	3.0	20	5.0	92.1	

としてイカ類やエビ類が少量含まれていたが、トドハダカより大きな魚類は殆ど含まれなかった。一方、着底曳網を介した P-4 においては、イトヒキダラが全重量の 85% を占め、トドハダカは 11.7% となった。しかし、イトヒキダラは殆どが体長 40 cm 以上の大型個体で占められていたため、個体数においてはトドハダカが優占していた。

各点で得られたトドハダカの体長組成を Fig. 4 に示す。採集されたサンプルは標準体長が 46.7 mm～78.9 mm の範囲にあり、全ての点で 55 mm～70 mm の未成魚が大半を占めていた。また、標準体長の平均値は全て

の点で 63 mm 前後で、各点の値に有意な差は見られなかった (One-way ANOVA, $p > 0.05$)。

以上のトロール採集の結果から、以後の解析においては、水深 300 m 以深の海域のみを対象とした。すなわち、各定線において、水深 300 m 以上の部分の距離に定線間隔 (8 マイル) を乗じて定線の面積とし、全ての定線を足し合わせたものが調査海域の面積となる。また、この海域における散乱層内の魚類マイクロネクトンが全てトドハダカ未成魚であったと仮定し、分布密度とバイオマスの推定には、トロール採集で得られた全てのサンプルの平均値 (63 mm, 2.9 g) を使用した。

式(1), (2)で得られた0.1マイル間隔の s_a をトドハダカの音響散乱断面積 σ_{bs} で割った値, すなわち調査海域における0.1マイル間隔の推定密度(g/m^2)の分布をFig. 5に, 各定線で得られたデータ数と推定密度の範囲および平均値をTable 2に示す。さらに, 式(1)から

Fig. 4 Standard length frequencies of *Diaphus theta* sampled at four sampling points. The mean value and standard deviation are given for each data.

Table 2 Range and mean value of fish density in each line area, and mean fish density and biomass in the total survey area

Line	Area (km^2)	Density (g/m^2)		
		n_i	Range	Mean (S.D.)
A	52.1	19	0.3–15.1	8.8(4.2)
B	68.6	25	1.0–17.2	7.3(5.7)
C	32.9	12	0.1–11.2	6.4(3.1)
D	57.6	21	0.1–35.6	8.9(10.4)
E	68.6	25	0.1–7.33	4.3(1.9)
F	63.1	23	0.2–19.5	9.3(4.6)
G	41.2	15	3.9–20.5	11.2(6.1)
H	—	—	—	—
I	82.3	30	0.1–29.4	13.5(10.3)
J	129.0	47	0.6–18.1	9.3(3.4)
K	101.5	37	0.1–25.8	15.9(6.9)
L	120.7	44	1.3–33.5	11.4(6.9)
M	112.5	41	4.5–168.3	50.4(25.3)
N	104.3	38	0.7–40.1	27.1(9.5)
O	345.7	126	4.5–41.3	20.5(8.2)
P	274.4	100	6.8–65.0	28.1(12.3)
Q	290.9	106	0.1–124.5	12.1(16.1)
R	27.4	10	0.1–18.6	5.1(6.1)
S	109.8	40	0.1–19.5	5.9(5.8)
Total area 2,082.6 km^2		Mean density in total area 17.3 g/m^2		Biomass 35,925.7 ton (cv, 0.46)

Fig. 5 Distribution of fish density (g/m^2) in the survey area.

(7)により得られた調査海域全体の平均密度とバイオマスを Table 2 に示す。散乱層における分布密度の最小値は 0.1 g/m^2 、最大値は 168.3 g/m^2 で、分布密度が高い場所は定線 I から西側の海域に多くみられ、ラインごとの平均値も西側で高かった (Fig. 5, Table 2)。

調査海域における散乱層出現海域 (水深 $> 300 \text{ m}$) の総面積は約 $2,083 \text{ km}^2$ で、平均分布密度は 17.3 g/m^2 であった。また、本海域におけるバイオマスは約 35,900 トンと推定された (Table 2)。

考 察

音響計測における潜在的な誤差 これまでハダカイワシ科魚類の TS に関する報告は僅かしか無く、音響手法による本科魚種の定量的研究は、散乱層の音響反射強度やその変化を相対的に観察するものが殆どであった。⁸⁾ これに対し本論文では、最近報告された TS 値を適用することにより、散乱層の音響反射強度を分布密度に変換し、調査海域でのバイオマスを算出した。これは音響計測によりハダカイワシ科魚類の生物量を示した最初の例であり、高度なネット逃避能力をもつ魚類マイクロネクトンの数少ない定量情報として非常に重要なものとなると考えられる。音響計測は、ビームの範囲内という比較的広い空間スケールで魚群をとらえることができる他、表層の魚群を除いては計測に対する逃避行動も無い。このため、魚群内での局所的な密度の変化や逃避行動の影響を受けやすいネット採集具に比べ、精度の高い生物量推定値が期待できる。しかし音響手法では、使用する TS 値や魚種・サイズ確認の方法により、実際の生物量と推定値に誤差が生じる可能性があるため、本論文の結果に関しても、これらの潜在的誤差要因とその影響について検討する必要がある。

まず、本論文で使用した TS-体長関係(式-6)は、トドハダカの有鰭個体に与えられた式である。¹⁰⁾ これに対し安間ら¹⁰⁾は、本種は体長が約 80 mm 以上になると鰭が萎縮し、体内に気泡を有さない個体が多く出現することを示したうえで、無鰭個体の TS-体長関係式の適用も検討する必要があると述べている。しかし、本調査海域で得られた本種のサンプル (46.7 mm~78.9 mm) にはこの様な大型個体は含まれていなかった。本研究で使用中層トロールは体長 600 mm 以上のスケトウダラやイトヒキダラを捕獲できるように開発され、本論文で対象とした沖合域 (水深 $> 300 \text{ m}$) の散乱層以外ではこれらが多く漁獲されていることから、²⁾ 散乱層に大型個体が含まれていたのに捕獲されなかったことは考えにくい。よって、本種の無鰭個体や他の大型魚種の存在による TS の誤差はほとんどないものと考えられた。

一方、安間ら¹⁰⁾は、35 mm 以下の小型個体では鰭が非常に小さいため、低周波 (e.g. 38 kHz) において気

泡共振の影響により TS 値が大きく変動する可能性があることも報告している。本論文における生物採集では、使用したトロールの特性上、体長 40 mm 以下の個体は採集されなかったが (Fig. 4)、散乱層にこれらの小型個体が多く含まれていた場合、TS 値の違いにより生物量の推定値に大きな誤差を生む可能性がある。しかし、本邦周辺のトドハダカは夏季に黒潮-親潮移行域で誕生し、成長しながら親潮域などの亜寒帯域に移動することが知られており、冬期の道東海域には 40 mm 以下の稚仔魚はほとんど存在しないと考えられている。¹⁴⁾ また本種以外の小型個体としては、イカ類、オキアミ類の他、セッキハダカ *Stenobranchius nannochir* やオオクチワシ *Notoscopelus japonicus* といった魚類マイクロネクトンの存在を考慮する必要があるが、これらの生物は鰭を持たず、音響反射強度は同体長のトドハダカに比べても十倍以上弱いことが知られている。⁹⁾ これらのことから、散乱層内における本種小型個体や他の小型生物の存在が本論文の結果に与える影響は微小であったと考える。ただし、これらの生物の影響についても、今後は IKMT¹⁵⁾ や MOCNESS¹⁶⁾ といったマイクロネクトン用採集具による情報を併用することで、より詳細な検証を行うのが望ましい。以上の理由から、本研究で使用した式(6)は、本海域のトドハダカの定量推定を行ううえで適切な TS-体長関係式であったと考えられる。

一方、式(6)自体には、体長約 6 cm の未成魚において、TS の推定値に $\pm 1.5 \text{ dB}$ (95% 信頼区間) 程度の誤差が含まれており、¹⁰⁾ これにより生物量の推定値に最大約 2 倍の誤差を生じさせる可能性がある。これに関し安間ら¹⁰⁾は、トドハダカの鰭形状は、成長段階のみでなく海域や季節によっても変化することを指摘し、北太平洋の広い範囲で採集されたサンプルを使用した式(6)に対し、海域を限定したサンプルを使用して回帰式の精度をあげる必要性を述べている。今後道東海域におけるトドハダカの鰭形状の情報を蓄積することで、本海域での TS 値の精度を向上させていく必要がある。また、TS 値は遊泳姿勢によっても大きく変化する可能性があるが、トドハダカの鰭はアスペクト比が低く球形に近い形状をとるため、遊泳姿勢による TS 値の変化はほとんど無い (1 dB 以下) ことが、理論的にも実験的にも証明されている。^{9,10)}

エコーグラムの形態と散乱層の判別 親潮海域における中層トロールによる層別採集から、李¹⁷⁾は、トドハダカの日中の生息深度が 300~600 m であったことを報告している。本研究におけるエコーグラムもこの報告とほぼ一致し、トドハダカによって構成される散乱層は深度 250 m 以深で現れ、分布の中心は 300 m 以深に見られた (Fig. 3(a))。また、底魚は海底に近い距離で分布するため、マイクロネクトンによる散乱層とは容易に区

別できることが、タラ類などの音響調査で示されているが、¹⁸⁾ 本海域で得られたエコーグラムにおいても、海底付近に集中する底魚の反応と海底から離れている本種の反応を確認することができた。特に、日中のエコーグラムでは、本種の散乱層は帯状に集中し、音響的な判別が容易に行えた (Fig. 3(a))。

上記の散乱層の分布深度に加え、本研究では、散乱層が陸棚斜面上の水深 300 m 付近で出現し始めることが分かった。また、この付近においては散乱層が海底に接し、底魚との判別が比較的困難となることも示された (Fig. 3(b))。一方、夜間においてはこの付近の散乱層が海底から離れ、鉛直的にも大きく分散するので、鉛直的な移動と分散が小さい底魚との判別が比較的容易になることも示された (Fig. 3(b))。これは、夜間に活発に捕食を行う底魚からの逃避行動による結果であると考えられている。¹⁹⁾

散乱層が帯状に集中し、エコーグラム上での判別が容易になることや、比較的強い音響反射を得られることを考えると、魚群の抽出、およびバイオマス推定には日中のデータを使用するのが好ましいと考えられる。しかし、散乱層が出現し始める水深付近での判別は夜間の方が容易であることから、特に陸棚斜面を調査海域に含む際には、夜間のエコーグラムも参考にして、散乱層を分離するのが望ましい。

いずれにせよ、調査の際には、トロール等の採集具を用いて、反応を形成している魚種の組成を詳しく調べることが重要である。また、音響的には、例えば周波数による TS の違いなど、マイクロネクトンや底魚の音響特性を基に魚種判別を行う技術²⁰⁾を発展させることも重要である。

トドハダカの分布密度とバイオマス 本調査海域においてトドハダカの密度推定が行われた例はないが、Gjøsaeter and Kawaguchi²¹⁾は、水深 1000 m 以上の黒潮-親潮移行域において、IKMT によるサンプリングの結果から、主に本種により構成される魚類マイクロネクトンの密度を約 6.5 g/m²と推定している。また、Il'Inskii²²⁾は、オホーツク海における中層トロールによるサンプリング結果から、本種の密度を 0.7~4.2 g/m²と推定している。一般的に、音響手法による密度推定値はネットサンプリングによる推定値の数倍から数十倍高くなることが知られているが、²³⁾ 海域の違いはあるにせよ、本研究の結果 (17.3 g/m², Table 2) もこの傾向と同様となった。これに関し、Watanabe *et al.*²⁴⁾は移行域の 200~700 m 層において中層トロールによるサンプリングを行い、漁獲効率 10% を仮定したうえで本種を主とするハダカイワシ科魚類の密度を 18.5 g/m²と推定し、採集具の特性から Gjøsaeter and Kawaguchi²¹⁾の推定に過小評価があった可能性を指摘している。上記以外

にも、採集具によるトドハダカの密度推定についてはいくつかの報告があるが、²³⁾ 今後、音響調査との比較も含め、各採集具間での較正を行うことで、それぞれの採集特性を明らかにし、過去に得られた推定結果の検証を行うことは、中深層性魚類の量的概念を再考するうえで重要である。

本研究において、調査海域におけるトドハダカのバイオマスは、約 3.6 万トン (約 123 億尾) と推定された (Table 2)。同じ調査において推定されたスケトウダラ (当歳魚~6 歳魚) の資源尾数が約 3 億尾²⁾であったことを考えると、本種は、直接的な餌生物として、またオキアミ類などをめぐる競合種として、本海域のスケトウダラ資源の動態にも大きな影響を及ぼしていると考えられる。また、本研究における調査海域は水深 500 m までの非常に狭い範囲に限定されていたが、本種は陸棚斜面より沖の外洋においても強い散乱層を維持することが確認されており、²⁰⁾ 周辺海域を含めると非常に大きなバイオマスを有すると考えられる。このことから、本種は外洋生態系の食物網においても非常に重要な位置を占めることは明らかである。

本研究の調査海域をはじめ、トドハダカが優占する太平洋亜寒帯域においては、多くの音響資源量調査が行われている。本論文で示した手法と得られた結果は、これらの調査で得られるデータが本種の定量化にも適用できる可能性を示している。また、本研究では、調査海域の西側で分布密度が高い傾向が見られた。この原因について本研究では明らかにされていないが、水温・塩分の観測結果から、親潮系水の流入による海洋環境の違いが本種の分布密度にも影響を与えていることが示唆されている (安間, 未発表)。今後、各種の音響資源量調査で得られたデータを用い、本種の定量情報を時空間的に蓄積させ、他魚種の定量情報や海洋環境情報と統合的に解析していくことが、太平洋亜寒帯海域の外洋生態系をより深く理解するうえで重要である。

謝 辞

本論文に用いた音響データと生物サンプルの収集にあたり、(株)日本海洋所属の調査船第三開洋丸の船長をはじめ、乗組員の皆様に多大なご協力をいただきました。心よりお礼申し上げます。なお、本論文には、水産庁が海洋水産資源開発センター (現、独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター) に委託して実施した事業「我が国周辺漁業資源調査 (スケトウダラ現存量調査)」において、「我が国周辺水域資源調査等対策推進事業費」により得られたデータを使用した。

文 献

- 1) Sakurai Y. A overview of the Oyashio ecosystem. *Deep-*

- Sea Res. II 2007; **54**: 2526–2542.
- 2) 本田 聡. 音響資源調査によるスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) 太平洋系群の若齢魚の年級豊度推定. 水研センター研報 2004; **12**: 25–126.
  - 3) 1995～2000 年太平洋イカ漁場一斉調査資料. 北海道区水産研究所, 釧路. 2000.
  - 4) Pikitch EK, Santora C, Babcock EA, Aakun A, Bonfil R, Conover DO, Dayton P, Doukakis P, Fluharty D, Haneman B, Houde ED, Link J, Livingston PA, Mangel M, McAllister MK, Pope J, Sainsbury KJ. Ecosystem-based fishery management. *Science* 2004; **305**: 346–347.
  - 5) 研究成果第 461 集. 海洋生物資源の変動要因の解明と高精度変動予測技術の開発. 農林水産省農林水産技術会議事務局, 東京. 2008.
  - 6) 山村織生. II-2. PICES-MIE におけるマイクロネクトン採集標準化試験. 日水誌 2007; **73**: 931–932
  - 7) 関 二郎. 北海道太平洋沿岸域におけるサケ幼稚魚の摂餌特性と餌料環境に関する研究. さけ・ます資源管理センター研究報告 2005; **7**: 1–104.
  - 8) Simmonds EJ, and MacLennan DN. *Fisheries Acoustics 2nd edit.* Blackwell Pub., Oxford. 2006.
  - 9) 安間洋樹. 音響手法を用いたハダカイワシ科魚類の資源量推定に関する研究. 博士論文, 東京大学, 東京. 2004.
  - 10) 安間洋樹, 澤田浩一, 宮下和土, 青木一郎. 北日本海域におけるハダカイワシ科魚類の鰭形態とターゲットストレンジス. 海洋音響学会誌 2008; **35**: 17–28.
  - 11) 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 澤田浩一, 高尾芳三. 計量魚群探知機の較正方法. 水工研技告 1995; **15**, 9–37.
  - 12) 高尾芳三. スケトウダラの音響資源調査. 月刊海洋 1994; **26**(10): 660–665.
  - 13) Williamson NJ. Cluster sampling estimation of the variance of abundance estimates derived from quantitative echo sounder surveys. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1982; **39**: 229–231.
  - 14) Moku M, Tsuda A, Kawaguchi K. Spawning season and migration of the myctophid fish *Diaphus theta* in the western North Pacific. *Ichthyol. Res.* 2003; **50**: 52–58.
  - 15) Issacs JD, Kidd LW. Issacs-Kidd midwatertrawl: final report. *Scripps Inst. Oceanogr.* 1953; **53**: 1–18.
  - 16) Wiebe P, Morton A, Bralder A, Backus R, Craddock J, Barber V, Cowles T, Flierl G. New Developments in the MOCNESS, an apparatus for sampling zooplankton and micronekton. *Mar. Biol.* 1985; **87**: 313–323.
  - 17) 李 雅利. 西部北太平洋亜寒帯域および移行域におけるハダカイワシ科魚類の生態学的研究. 博士論文, 東京大学, 東京. 2000.
  - 18) Orłowski A. Acoustic seabed classification applied to Baltic benthic habitat studies: a new approach. *Oceanologia* 2007; **49**: 229–243.
  - 19) 山村織生. 親潮海域のマイクロネクトン. 北水研ニュース 1998; **55**: 2–3.
  - 20) Yasuma H, Miyashita K, Yamamura O. Acoustic identification and density estimate of *Diaphus theta* (myctophidae) off Hokkaido, Japan. *J. Acoust. Soc. Am.* 2006; **120**: 3019–3019.
  - 21) Gjøsæter J, Kawaguchi K. A review of the world resources of mesopelagic fish. *FAO Fish. Tech. Pap.* 1980; **193**: 1–151.
  - 22) Il'Insky EN. Composition and structure of mesopelagic nektonic community of the Sea of Okhotsk. PhD Thesis, Valadivostok, Pacific research institute of fisheries and oceanography, Vladivostok. 1995.
  - 23) Brodeur R, Yamamura O. Micronekton of the north Pacific. *PICES science report No. 30*. PICES, Sidney, B. C. 2005.
  - 24) Watanabe H, Moku M, kawaguchi K, Ishimaru K, Ohono A. Diel vertical migration of myctophid fishes (Family Myctophidae) in the transitional waters of the western North Pacific. *Fish. Oceanogr.* 1999; **8**: 115–127.