

水産資源管理談話会報

第40号

(財)日本鯨類研究所 資源管理研究センター

2007年 8月

翻訳・公表希望者は以下の手続きとり、著者の許可を得た上で
翻訳・公表する。

1. 翻訳・公表希望者は文章（FAX、手紙）で著者、表題および
会報の号を明記し、資源管理談話会事務局を通じて要請し、
著者の許可を得て翻訳・公表する。
2. 翻訳公表物を資源管理談話会事務局に送付する。

目 次

お知らせ

REPORT OF THE 57TH MEETING OF THE
INTERNATIONAL WHALING COMMISSION'S
SCIENTIFIC COMMITTEE

Luis A. Pastene . . . 1

第58回IWC科学委員会報告

後藤睦夫 . . . 5

スケトウダラ資源調査への音響資源調査の導入

本田 聡 . . . 9

スケトウダラ太平洋系群および
日本海北部系群の資源変動について

船本鉄一郎 . . . 25

スケトウダラ資源調査への音響資源調査の導入

本田 聡・船本鉄一郎・八吹圭三（北水研）

1. はじめに(水産研究所における資源評価の流れ)

1996年の国連海洋法条約批准に伴い、日本においてもTAC(Total Allowable Catch)制度が導入され、北海道周辺に分布するスケトウダラもその対象魚種となった。日本のTAC制度下では、漁業資源の持続可能な管理を目的としつつ、かつ様々な社会経済的要因を考慮に入れた上で、魚種・系群毎に年間の漁獲可能量の上限を定める形で漁獲量規制を行う。このTAC設定に際して、生物資源管理の立場から参考資料として提出されるのが、生物学的許容漁獲量(Allowable Biological Catch, ABC)を初めとする、様々な漁獲圧の下での資源の将来予測である。将来にわたる資源の動向を予測するためには、漁獲対象資源の成長、生残、成熟率、そして年齢組成や再生産関係など、対象生物における多くの生物学的パラメータや資源の現状を表す指標値が要求される。そして、各重要水産資源についてこれらの諸数値・関係を推定し、それらに基づいて資源の将来予測を行い、資源評価報告書として水産庁に提出することが、独法水産総合研究センターの資源研究部門における主要な業務の一つとなった。

現在水産総合研究センターで実施する資源評価・解析において、年齢別漁獲尾数の推定が可能な資源に対してはVirtual Population Analysis(VPA)が多用されている。本稿で紹介するスケトウダラ太平洋系群の資源評価においても、解析の基本はPopeの近似式によるVPA(Pope, 1972)が用いられている(船本ほか, 2007)。VPAでは、漁獲統計および市場サンプリング等による採集標本の精密測定・年齢査定結果から、各年の年齢別漁獲尾数を算出した上で、漁獲による獲り減らし量と自然死亡量を足し合わせながら、過去に遡って年別年齢別の漁獲死亡係数(F)と資源尾数の双方を推定する。この方法の利点は、漁獲努力量を用いずに資源量の推定が可能なことで、年齢別漁獲尾数さえ入手できれば、漁船や漁具の能力、あるいは漁獲量の変化などを考慮することなく資源計算を行うことが可能となる。また、遡る年数が多くなるほど、推定の精度は向上し、値は安定する。しかし、このことは同時に、遡る段階の少ない近年の若齢魚については、その資源尾数の推定値は安定せず、精度を欠くという欠点の存在を意味する。チューニングVPAはこの欠点を補うための手法である(平松, 1999)。

VPAにより過去の年齢別資源尾数とFを計算したら、次はFを仮定した上で、未来に向かってVPAを逆方向に計算し(前進コホート)、任意のFの下での将来の年齢別資源尾数および漁獲尾数・漁獲量の推移を予測する。但し、新規加入群量についてはこの方法では求めることができないので、将来の産卵親魚量を前進コホートの結果から推定し、その値に近年の再生産成功率(RPS, Recruit per Spawning)の平均値(RPSave)、あるいは過去のRPSからランダムに選択した値を掛けることによって算出する(船本ほか, 2007)。

これら一連の作業過程とその背景となる諸情報、及びその結果を報告書に纏め、地域ブロック資源評価会議を経て全国資源評価会議において承認されれば、水産研究所の資源研究部門に与えられた資源評価業務の主たる部分はほぼ終了となる。

2. 漁業情報のみに基づくVPAによる資源解析の限界と直接推定法の導入

1990年代以降のスケトウダラ太平洋系群における新規加入の特徴は、数年に一度の割合で高豊度の新規加入群(卓越年級群)が発生し、その後の年齢構成ならびに資源量の推移に大きな影響を与えることである(船本ほか, 2007)。過去に1994、1995年級群が卓越年級群として漁獲対象資源に加入した際には、翌1996年以降に発生した年級群が連続して極めて低い豊度に留まった中で、その後数年間にわたって高い漁獲量の維持に大きく寄与し、またRPSがそれほど高くない中で高豊度の2000年級群を産み出す親魚としての役割を果たした。よって、卓越(あるいは強勢)年級群の発生の有無を事前に知ることができたならば、資源管理の上で重要な、漁獲オプションとその下で想定される資源の応答予測について、より早く確実な予測を提示することが可能となると期待される。しかし、現時点では卓越年級群が発生する条件およびメカニズムは明らかではなく、その発生の有無を事前に予測し、資源の将来予測に具体的に織り込むことは現状では不可能である。となれば、次善の策として、新たに発生した年級群が初期生残過程など数的に大きく変動する過程を経、ある程度豊度の変化が落ち着いた時点で、できる限り早期にその年級の規模を把握し、今後漁獲対象資源としてどの程度の新規加入が見込まれるか、特にそれが卓越(あるいは強勢)年級群なのか、それとも低い豊度に留まるのかを予測し、資源動向の将来予測に反映させることが考えられる。

本節では、まずVPAに必要な基礎データとなる漁獲情報の特徴とその取り扱いにおける制限、さらにVPA自体の持つ問題について簡単に触れる。その上で、従来のシンプルなVPA(チューニングを行わないシングルコホート解析、平松(1999)参照)による資源解析では、新規加入群の豊度を精度良く把握するまでにどの程度の年数を要するのか、新規加入群として漁獲が始まってから、その年級の漁獲データが毎年収集・取り纏められ、十分なデータが蓄積した後に解析されるまでの過程を、時間の経過に沿って示す。

資源解析にVPAを適用する場合に必要なのは、前述のとおり「年齢別漁獲尾数」の経年データである。スケトウダラ太平洋系群の年齢別漁獲尾数データは、市場に水揚げされた漁獲物の一部

を抽出して精密測定および年齢査定を行い、得られた年齢別重量比および年齢組成比を基に、漁獲統計から得られる毎年の漁獲量を尾数に変換し、年齢群毎に振り分けて作成する。ここで用いる市場標本・漁獲統計は共に実際の漁業に基づいて得られる情報であるが、これらにはいくつかの制約が存在する。一つは、漁獲統計の取り纏めに時間を要することである。スケトウダラ太平洋系群は、沖合底びき網漁業(沖底)および刺し網などの沿岸漁業により利用されており、その漁獲量は、沖底であれば漁獲成績報告書を通して、また沿岸漁業では各地の漁業協同組合を通じて集計される。この集計には、漁期終了後少なくとも数ヶ月を要する。スケトウダラの漁期年は4月に始まり、3月末に終わるため、毎年資源評価を実施する初夏の時点では、その前年度までの漁獲量を集計し、数値にするのが精一杯で、評価実施年における最新の漁況を数値として解析過程に取り込むことは叶わない(ただし、参考情報として検討に加えることは行っている)。もう一つの制約は、漁獲対象とならない年齢群・サイズ、海域の情報を得ることができないことである。これは、情報源が漁業である以上当然のことではあるが、この制約により、漁獲対象資源に加入する以前の若齢魚の情報は得ることができない。

さらに、既に述べたように、VPAによる資源解析では、遡る段階の少ない近年の若齢魚の資源尾数推定値は、その精度に問題を抱えているという点も、特に将来予測を行う上では非常に大きな影響を及ぼすことになる。

これらの特徴および問題点に留意しながら、実際の漁業とそこから得られる情報の取り扱い、資源解析の進捗との対応について検討する(図1)。

最も早く資源を利用する東北太平洋沿岸の沖底では、0歳から3歳程度の幼魚・未成魚を対象とした操業を行っている。特に0~1歳魚については、北海道沿岸では業界団体の自主規制サイズ未満にあたることから、漁獲によるデータが得られるのはほぼ東北太平洋海域に限られる。しかし、東北太平洋海域の沖底による0歳魚の漁獲量の動向と、翌年以降に東北および北海道太平洋海域全体において漁獲される未成魚・成魚の年級豊度との間には強い相関はなく、この漁獲動向を将来の加入量の指標として用いることは適切ではない(八吹・本田, 2001)。

一方、道東海域における沖底からは、新規加入群として主たる漁獲対象資源に加入したばかりの2歳魚およびそれ以上の未成魚・成魚の漁獲情報が得られる。漁獲データが2歳魚の秋以降から収集され始めたとして、その漁獲量が統計として集計されるのは、上述の理由により翌年度になる(この時点で評価対象年級群は3歳となる)。翌年度の資源評価では、その数値を用いて資源計算を行うことが可能となるものの、VPAの特性上、遡る年数が少ないと精度の悪い推定値しか得られない。レトロスペクティブ解析(retrospective analysis)の結果から、VPAで求めた若齢魚の推定資源尾数が収束するためには、対象とする年級群が少なくとも5歳魚として漁獲されるまでの毎年の漁獲尾数情報が蓄積されていることが必要である(船本ほか, 未発表)。すなわち、新規加入した年級群が成長し、やがて5歳魚として漁獲され、その漁獲統計が取り纏められる翌年(この時点で評価対象年級は6

歳)まで待たないと、若齢魚時点での資源尾数を精度良く推定することはできない。ようやく十分なデータが揃ったところで資源評価を行い、評価対象年級群の豊度を含む資源量を推定し、それを元に翌年度の漁獲方針案(ABCを含む)を複数作成・提言するわけだが、その提言が実際に反映するのは翌年の漁獲可能量であるから、その時点では当初対象としていた年級は既に7歳になっている。これでは、VPAによって年級豊度が求まった時には、既にその年級は主たる漁獲対象年齢とし

対象年級の年齢	イベント
2歳秋	(実質的) 漁獲開始
3歳春	2歳魚時の漁獲統計取り纏め (漁獲尾数のピークは2~3歳) ・ ・ (4歳冬には大半が成熟、以後毎年再生産に関与)
6歳春	VPAに十分な年数の漁獲統計が蓄積 →翌年の漁獲方針提言案を検討
7歳春	漁獲方針に関する提言が反映しうる

年級豊度が確定する頃には、漁獲のピークをとうに過ぎ親魚として既に何度も再生産に関与した後。
→漁獲による資源管理を行うには手遅れ

図1. 資源評価対象年齢における漁獲情報蓄積の推移と管理方策提言への反映

て利用され、あるいはそのピークを過ぎてしまっており、今さら漁獲量を調整することでその年級の豊度あるいは産卵親魚量を調整する余地など、事実上残されていない(図1)。

このように、漁業情報のみに基づくVPAによって資源評価および将来予測を行う限りにおいては、スケトウダラ太平洋系群の新規加入群量を早期に精度良く予測し、その結果を、漁獲による資源のコントロールが可能な段階でABCや種々のFの選択肢といった漁獲方策案に反映させることは、事実上困難であった。

そこで、北海道区水産研究所では、スケトウダラ太平洋系群の新規加入群量をより早期にかつ高精度に推定する手法として、調査船による直接推定法を検討し、1996年から導入した。直接推定法には、本稿で説明する音響資源調査(計量魚探調査)や面積密度法など種々の方法が含まれる。これらの調査法の利点として、任意の場所や対象に対して調査を行うことが可能であり、かつ調査終了後比較的早期に結果を得ることが可能である点が挙げられる。特に音響資源調査は、調査船に装備された計量魚探機を作動させて、あらかじめ設定した定線上を航走するだけで、対象とする魚の基本的な分布情報を収録でき、調査効率が高い。この音響資源調査によって、漁獲対象資源に加入する以前の若齢魚の年級豊度あるいはその指標値を精度良く把握することができたならば、その結果を同年夏に実施する資源評価に反映させることで、当該年級群が本格的な漁獲に晒される

前に、資源管理上より確実かつ効果的な漁獲方策案を示すことができるようになるはずである。

3. 音響資源調査の概要

調査の概要について簡単に説明する。毎年7～8月にかけて実施される資源評価作業に間に合う様にスケトウダラ若齢魚の年級豊度の指標を得ることを目的として、初夏の北海道および東北太平洋沿岸、特に襟裳岬以東の道東海域に分布するスケトウダラ1歳魚を主たる対象として調査計画を策定した。沿岸側水深50m付近から沖合側水深500m付近まで、等深線を直角に横断する方向に8カイリ間隔で平行に設定した定線に沿って船を航走させ、航跡下の魚群分布情報を収集した(図2)。また、魚群反応の得られた場所では、時間に余裕のある限り、できるだけ多くの魚群反応に対して離・着底あるいは中層トロールによる漁獲試験を実施した。得られた漁獲物は船上で精密測定と簡易年齢査定を実施し、各個体の年齢を明らかにした。漁獲試験の頻度については、近年は北海道太平洋側海域で約60回、東北太平洋側海域で約20回前後の曳網を毎年実施している。

本調査を開始した1996年当時は、北海道太平洋沿岸におけるスケトウダラ幼魚、若齢魚の分布水深帯や日周鉛直移動の有無や深度範囲など、分布生態に関する既往の知見が少なかったため、実際の調査時には音響計測と同時に幼魚・若齢魚の分布に関する情報を併せて収集し、その結果として調査設計に修正の必要が生じた場合には、その都度翌年の調査設計を変更して対応した。なお、スケトウダラ太平洋系群の分布域全体が北海道太平洋沿岸および東北太平洋沿岸と広大であるのに対して、初期の主たる調査海域を襟裳岬以東の道東海域で開始した理由は、道東海域では元々オッターボードを用いた沖底が操業しており、魚種確認のためのトロール曳網に漁業者の理解を得やすい海域であったことが挙げられる。その後、調査の習熟、漁業者の理解と信頼を得ながら、徐々に調査海域を西側へ拡大し、現在は襟裳以西太平洋沿岸および東北太平洋沿岸(除:沖底禁止ラインより沿岸側)を含む、北方四島周辺海域を除く当該系群の分布域全域における初夏のスケトウダラの年齢別分布情報を毎年収集し、その直後に実施される資源評価に利用している(図2)。

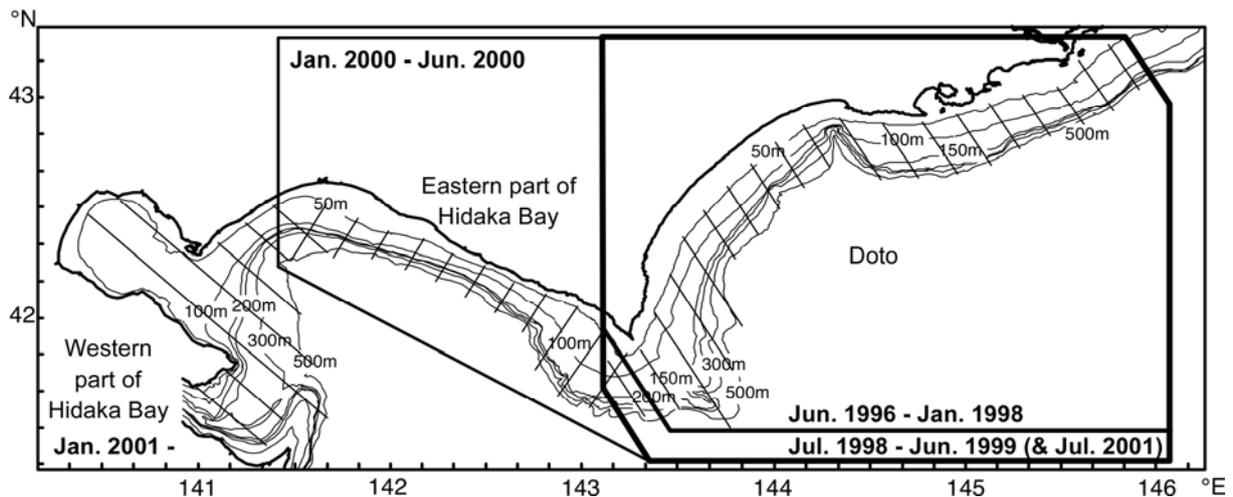


図2. スケトウダラ太平洋系群における音響資源調査の対象海域とその拡大の過程. 2001年7月以降は上図に示した範囲を更に超え、東北太平洋沿岸海域を調査範囲に含めて実施している

4. 音響資源調査の原理と収録した音響データの処理

ごく簡単に音響資源調査の原理を説明する。船底に装備された送受波器から海中に真下に向かって超音波を放つと、魚あるいは魚群によって遮られた音が散乱し、上向きに跳ね返っていった音が再び船底の送受波器で受波され(エコー)、その強さが数値で収録される。エコーの値は出した音の強さに対する戻ってきた音の強さの比で示されるが、極めて小さい値をとるため、通常は常用対数を取ってdBで表示されることが一般的である(但し魚探機のメーカーや研究者によっては常用対数を取らない他の単位を用いる場合もある)。エコーの強さは、魚種や、魚群を構成する個体のサイズの大小、個体数の多寡に応じて決まる。一般的な音響資源調査では、調査定線に沿って一定の距離を航走する毎に、単位海面面積下の水柱に分布した魚の平均量を、エコーの強さとして連続的に収録する(面積後方散乱係数:海面1 m²の場合は s_a 、海面1 平方カイリの場合は s_A と表記。本稿で紹介する調査では海面1 m²あたりの魚群分布量(s_a)を採用)。

このようにして収録されたエコーを実際の魚の分布尾数に変換するためには、一尾当たりの魚が跳ね返すエコーの強さ(ターゲットストレングス、TS)で、魚群全体から跳ね返ってきたエコーの総量を除する。一般に、魚1尾が跳ね返すエコーの強さは、その体長の二乗に比例する。スケトウダラの場合は、体長(尾叉長)と平均TSの関係式が求められており(Foote and Traynor, 1988、後述)、その式に尾叉長(集団の場合は平均尾叉長と標本分散)を代入すると、そのサイズのスケトウダラの平均的なTS(対数表示では TS_{AVG} 、線形表示では $\overline{\sigma_{bs}}$)が求まる。

道東海域に分布するスケトウダラの場合、スケトウダラとそれ以外の魚種が混在して魚群を形成することはごく希で、沿岸側の浅い陸棚域には0~1歳といった若く小さな個体が、また水深が深くなるにつれてより大型、高齢の個体が、それぞれほぼ同じサイズの個体同士で集群し、等深線に沿った

帯状の魚群を形成することが多い(志田, 2002, 本田, 2004)。単一の年齢群のみで魚群が構成されている場合には尾数換算も容易であるが、一つの魚群が複数の年齢群によって構成されている場合(特に分布水深が深い側で、高齡魚が多く含まれる場合)には、魚群のエコーを各年齢に分配しながら尾数換算しなくてはならない。

そこで、計量魚探による計測と併せて実施するトロールによる漁獲試験で実際にその魚群の一部を採集し、スケトウダラ魚群中の年齢組成(年齢別の尾数比)とその年齢別の平均尾叉長およびその分散を求める(ここで、トロール曳網で採集された魚の年齢組成やサイズ組成は、実際に計量魚探で計測した魚群における真の年齢・サイズ組成をそのまま反映しているものと仮定する)。

年齢査定は、耳石表面に現れる年輪数を船上にて実体顕微鏡で読輪して行う。正確な年齢査定は、後日陸上にて耳石を樹脂包埋した後に切断し、その断面を観察することによって行うが、2歳以下の若齡魚であれば、上述の簡易査定法でもほぼ正確に年齢を判別することが可能である。

続いて、年齢査定結果から age-length key (各体長階級における年齢の頻度分布表)を作成し、採集された個体を尾叉長に応じて各年齢(本調査では、1歳・2歳・3歳以上の3グループ)に振り分け、トロール標本における年齢組成比 p_i (i は年齢)を計算する。

さらに、年齢ごとに平均尾叉長 \overline{FL} (とその母標準偏差 σ_{FL}) を計算し、以下の式に代入することで、スケトウダラの年齢別平均 TS (ここでは平均 TS の線形表示である $\overline{\sigma_{bs}}$ で表記) を求める。

$$\overline{\sigma_{bs}} = Ts_{cm} \cdot \left(\overline{FL}^2 + \sigma_{FL}^2 \right) \quad (\text{Sawada } et \text{ al.}, 1993) \quad (4.1)$$

ここで、 Ts_{cm} は尾叉長の2乗で基準化された TS の線形表記である。この際、スケトウダラの基準化 TS としては $Ts_{cm} = -66.0$ dB (Foote and Traynor, 1988) を用いた。

上述の式で求めた年齢別 $\overline{\sigma_{bs}}$ と年齢組成比 p_i を掛け合わせた値を分子に、またそれを各年齢分足し合わせた値を分母にとると、計量魚探で捉えた魚群から得られたエコー総量の各年齢群への

配分比率: $\frac{p_i \cdot \overline{\sigma_{bsi}}}{\sum_{i=0}^{Max} (p_i \cdot \overline{\sigma_{bsi}})}$ を求めることができる。これに、魚群全体から得られたエコー量 s_a を掛ける

ことで、その年齢群に分配されるエコー量 s_{ai} を計算し、さらにそれを各年齢の平均 TS ($\overline{\sigma_{bsi}}$) で割ることにより、その魚群中に含まれる各年齢の分布尾数(密度)を計算することができる:

$$D_i = \frac{s_{ai}}{\sigma_{bsi}} = s_a \cdot \frac{p_i \cdot \overline{\sigma_{bsi}}}{\sum_{i=0}^{Max} (p_i \cdot \overline{\sigma_{bsi}})} \cdot \frac{1}{\sigma_{bsi}} \quad (4.2)$$

ここで、
 i : 年齢
 D_i : 年齢 i の年級の海面 $1m^2$ あたり分布尾数
 s_{ai} : 年齢 i に分配された s_a

$\overline{\sigma_{bsi}}$: 年齢*i*における $\overline{\sigma_{bs}}$

s_a : 対象となる魚群のエコー総量(線形表記)

p_i : 漁獲物中に占める年齢*i*の個体の割合

この計算を、計量魚探で捉えられた全ての魚群反応に対して行うことで、様々な年齢の個体を含んだ魚群のエコーは、年齢別の分布尾数に分配・換算される。

このようにして求めた年齢別の魚群分布密度を地図上にプロットすると、年齢別の分布マップを作ることができる。図3は2001年6月の調査における年齢別分布パターンの例であるが、基本的に毎年初夏の時期には、スケトウダラ0歳魚はまだ噴火湾口部海域に留まり、道東海域には達しておらず、1歳魚は襟裳岬周辺から釧路海底谷付近にかけての陸棚の沿岸側に、また高齢になるにつれて釧路海底谷以東の陸棚斜面側に分布域を移すパターンが観察される(本田, 2004)。

本調査では、8カイリ間隔で平行に引かれた定線に沿って、航走0.1カイリ毎に海面1m²あたり平均分布密度を出力させているので、これらの値を0.1カイリ分引き延ばした上で、さらに定線間隔分両脇にそれぞれ4カイリずつ引き延ばして合計してやれば、海域全体での年齢別現存量推定値(尾数)が求まる。

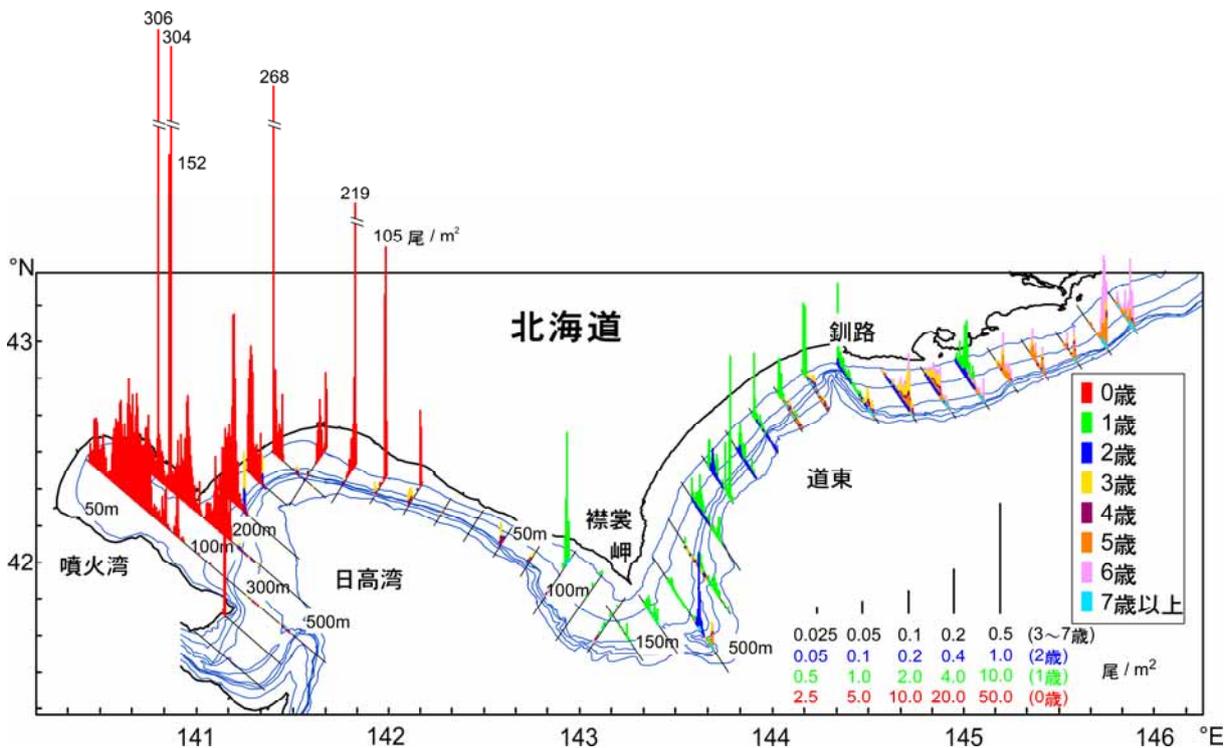


図3. 2001年6月の北海道太平洋沿岸海域におけるスケトウダラの年齢別分布パターン

なお、調査の設計から魚群エコーの年齢分解、年齢別現存量推定など一連の作業手順については、水産音響資源調査マニュアル(本田(編), 2004)に詳しく記載してあるので、そちらを参照していただきたい。

5. 音響資源調査で得られる現存量推定値の年級豊度指標としての妥当性

3節にて述べたように、本調査は当初道東海域のみを対象として始まった。その後徐々に調査海域を拡大し、現在は東北太平洋岸を含め、スケトウダラ太平洋系群の分布範囲のほぼ全域を網羅するようになったが、最もデータの蓄積があるのは、初夏の道東海域に分布する若齢魚の年齢別現存量推定値である(図2)。一方、2節では、VPA で求まる若齢魚の推定資源尾数が安定した値に収束するためには、少なくともその年級が5歳魚として漁獲されるまでのデータが揃っている必要があることに触れた。そこで、上述の条件を満たした年級群についてVPAで算出された推定資源尾数を正しいものと仮定した上で、音響資源調査で推定された道東海域におけるスケトウダラ1歳魚の現存量推定値と、その5年後以降にVPAで推定される1歳魚当時の資源尾数との間で回帰分析を行い、音響資源調査によって得られる道東海域の現存量推定値が、スケトウダラ太平洋系群全体としての当該年級の豊度を反映する指標として有効か否かについて考察した。

音響資源調査によって推定された道東海域におけるスケトウダラ1歳魚の現存量推定値を独立変数、VPAによって推定したスケトウダラ太平洋系群全体の1歳魚当時の推定資源尾数を従属変数として回帰分析を行い、両指標値の関係について検討した(図4)。なお、解析にあたって使用したデータは、5歳魚時点での漁獲量の集計が済んでいる年級群、すなわち、調査が実施されなかった1997年を除く1996~2001年の6~7月に実施された音響資源調査で得られた昼間の道東海域における1歳魚の現存量推定値と、VPAを用いて計算した1996年~2001年(同じく1997年分を除く)の太平洋系群全体における1歳魚の年齢別資源尾数である。なお、5歳魚時点での漁獲尾数データが未集計あるいは未漁獲である2001年級群以降の近年分のデータについては、回帰分析には用いなかったが、同じ散布図中に表記を変えて示した。

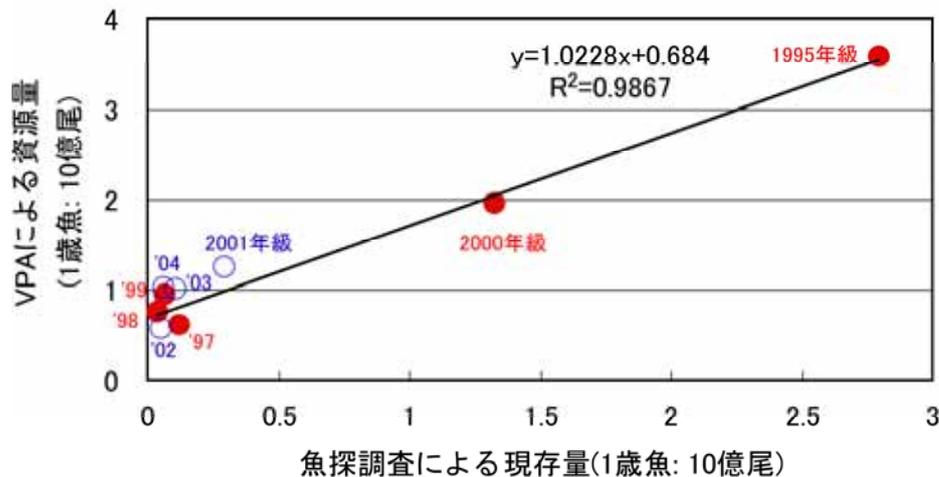


図 4. 音響資源調査で求めた初夏の道東海域に分布する 1 歳魚の現存量推定値と、VPA によって求めた 1 歳魚時点の資源尾数との関係。中を塗りつぶした赤丸は回帰直線を求めるのに用いた年級群（1995，1997～2000 年級群）、中抜き青丸は 5 歳魚時点での漁獲尾数が未集計あるいは未漁獲の近年の年級群（2001 年級群以降）を示す。

1981 年度以降最大の卓越年級群となった 1995 年級および近年では強勢の年級であった 2000 年級群の評価については、音響資源調査による道東の現存量推定値、VPA による資源尾数推定値ともに高い値を示した。それら以外の年級群については、最近年の結果も含め、音響資源調査、VPA による解析のいずれの評価法においても低い豊度に留まり、原点の近傍にプロットされる結果となった(図 4)。これら現存量 x および資源量 y との間で得られた回帰直線式は、以下のようになった：

$$y = 1.0248x + 621.83 \times 10^6 \quad (5.1)$$

$$(R^2 = 0.98)$$

この正の傾きと切片を持つ回帰直線式は、寄与率 0.98 と当てはまり自体は非常に良い数値を示しているものの、実際のデータのプロットからは、原点よりわずかに上の Y 軸近傍に集中して分布する貧弱な年級群の集団と、飛び抜けて大きな値を示した最大の卓越群である 1995 年級群を結び、その中間付近に強勢年級群となった 2000 年級群がプロットされているだけともいえる。仮に多様性に富んだ様々な水準の新規加入群のデータが存在したならば、回帰直線式の妥当性および精度についてより詳細な検討ができたかもしれないが、近年の当該系群における新規加入群の出現状況が、非常に弱い年級か、あるいはたまに出現する卓越・強勢年級かのいずれかに偏っているために、このような結果とならざるを得ない。なお、規模の小さな年級群の集団内で、さらに年級群間の規模の大小を音響資源調査の結果から予測できるかどうかについては、その違いを検出し得る有意な回帰は得られなかった(本田, 2004)。しかしながら、約 2 倍豊度が異なる 2000 年級群と 1995 年級群が、同じ回帰直線上に当てはまり良くプロットされたことは、この回帰直線式は、ある程度以上の規模の年

級群が発生した際には、音響調査によって求まる初夏の道東海域に分布するスケトウダラ1歳魚の現存量推定値が、その年級の規模を予測する上で有効な指標となることを示しているともいえる。

今回得られた回帰直線式で興味深いのは、切片が正の値をとり、原点を通らないことである。これについては、以下のような理由が考えられる。第一に、Y軸にプロットされるVPAによる資源尾数が当該系群全体の1歳魚の資源尾数であるのに対して、X軸にプロットされる初夏の1歳魚の現存量(尾数)推定値は、襟裳岬から東側の道東海域のみにおける現存量であり、1歳魚の分布が想定される海域の全てを網羅していないことが挙げられる。これまでの調査結果から、音響調査を実施する初夏の時期には、スケトウダラ1歳魚の分布の大半は道東海域に集中的に分布するのが例年のパターンであるが、年によっては、相当量の1歳魚が道東海域のみならず襟裳岬より西側の陸棚域にも分布していた例も観察されている(本田, 2004)。そのため、道東海域で捉えた1歳魚の現存量(尾数)は、理論的にも系群全体としての1歳魚の資源尾数以下にならなくてはならない。この点については、現在は調査海域を従来の道東海域のみから襟裳岬以西の日高湾、道南海域、さらに東北太平洋沿岸まで拡大して実施していることから、これらの海域での調査データが蓄積する数年後には、分布域のほぼ全てを合計した形での1歳魚の現存量推定値とVPAによる1歳魚資源量推定値との間で、同様の比較検討を行えるようになるものと考えている。もう一点は、音響資源調査における探知範囲の限界に基づく問題である。音響資源調査において、海面および海底にごく近い層は「表層/海底デッドゾーン」と呼ばれ、その層に分布した魚群は、現在の計量魚探機では正確な計測を行うことができず、過小推定あるいは不正確な数値として出力される危険性が高い。さらに、実際のデータ解析にあたっては、海底による反応を魚群と間違えて計算に含めるようなことが発生しないよう、海底デッドゾーンの範囲からさらに1~数m上までの層に含まれる反応を全て切り捨て、それより上の層で捉えられた、確実に魚の反応と思われるエコーのみを現存量推定に用いるように設定している。今回対象としている初夏の道東海域に分布するスケトウダラ1歳魚は、昼間でも海底から離底し、海底直上あるいは中層域に分布するのが数多く観察されており(本田, 2004)、海底デッドゾーンの影響を受けにくい、計量魚探による音響資源調査の対象としてはきわめて好適な分布生態を持つ魚種であるといえる。しかしながら、必ずしもスケトウダラ1歳魚の全ての魚群が海底から十分に離底し、中層に浮いているとは限らず、場所や時間帯によっては、海底にへばりつくように分布したり、あるいは海底から中層に向かって立ち上がるような魚群もしばしば観察される。その場合、海底デッドゾーン(+数m)より上層に分布する魚群のエコーは問題なく計量魚探機で捉えられ、資源量に換算されるが、海底デッドゾーンより下側に分布する魚群のエコーは計算の際に切り捨てられ、現存量に反映されないため、結果的に過小推定となる可能性が高くなる。以上二点が、音響資源調査から求めた現存量推定値が、その数年後にVPAによって計算される資源量を常に下回り、その回帰式が原点を通らずに正の切片を持つ主な理由と考えている。

なお、1歳魚の場合と同様に、2歳魚以上の各年齢群においても、音響学的に捉えた現存量推定

値とVPAによる資源量推定値の関係について検証している。その結果、3歳魚以下の若齢魚では、両指標値の間に有意な正の回帰直線式が得られたものの、4歳魚以上の高齢魚では、両者間に有意な回帰関係はみられなかった(本田, 2004)。この理由としては、スケトウダラが成長し高齡・大型になるに伴って海底に常時着底する傾向が強まり、音響学的手法では十分に捉えることができなくなるためと考えられる。

6. 音響資源調査で求めた現存量推定値のVPAへの取り込み

上述した調査・解析によって求められた、初夏の道東海域に分布する1歳魚の現存量推定値(尾数)は、その約一ヶ月後に開催される資源評価会議へ反映させるべく、シンプルなVPAを補正する資料として資源解析に取り込まれる(船本ほか, 2007)。

本系群の資源評価に用いているVPAは、ADAPTと呼ばれるチューニングVPAの一手法である。齡構成については、0歳から始まり8歳以上までの9段階で、6歳以下の年齢別資源尾数についてはPope(1972)の近似式を用い、また7歳および8歳以上のプラスグループについては、7歳に対する漁獲係数Fと8歳以上に対するFが同じであるという仮定の下で、以下に示す方法(平松, 1999)に基づいて求めている:

$$N_{7,y} = \frac{C_{7,y}}{C_{8^+,y} + C_{7,y}} N_{8^+,y+1} e^M + C_{7,y} e^{\frac{1}{2}M} \quad (6.1)$$

$$N_{8^+,y} = \frac{C_{8^+,y}}{C_{8^+,y} + C_{7,y}} N_{8^+,y+1} e^M + C_{8^+,y} e^{\frac{1}{2}M}$$

最初に、何もチューニングを施さないシンプルなVPAを計算した後、1歳魚については初夏の道東海域に分布する1歳魚の現存量推定値を、また2歳魚以上の漁獲対象資源については、道東海域で操業する沖底の年齢別CPUEを用いてチューニングを行う。具体的には、以下に示す目的関数の和(SSQ)を最小にするような最近年度のF(ターミナルF)を、MS-Excelのソルバー機能を用いて求める:

$$SSQ = \sum_y (\ln(I_{1,y}) - \ln(qN_{1,y}))^2 + \sum_{a,y} (\ln(X_{a,y}) - \ln(QB_{a,y}))^2 / 7 \quad (6.2)$$

右辺第1項が音響資源調査で求めた道東海域の1歳魚現存量によるチューニング、右辺第2項が沖底の年齢別CPUEによるチューニングの項にあたる。ここで、 $I_{1,y}$ はy年度の1歳魚の現存量、 $N_{1,y}$ はVPAから推定されるy年度の1歳魚の資源尾数、 $X_{a,y}$ はy年度のa歳の沖底のCPUE、 $B_{a,y}$ はVPAから推定されるy年度の漁期中央におけるa歳の資源重量、qおよびQは比例係数である。また、現存量の項とCPUEの項をほぼ等ウエイトにするために、CPUEの項を用いた年齢数(2~8歳)

である7で除している。チューニングに用いる諸情報は、沖底年齢別 CPUE については2歳以上、音響資源調査による現存量推定値については1歳魚のみであるが、(6.2)式において残差平方和の計算に用いられた年級群は、それ以前の年齢時に遡ってチューニングの効果が現れる(図5)。よって、通常のVPAでは精度に問題を残していた最近年の若齢魚部分(0~1歳魚)の殆どの部分については、このチューニングを実施することにより、早い時点でより実際に近いと思われる数値に補正される。但し、最近年の0歳魚の資源尾数のみは、上述のチューニングの効果が及ばないため、まず1歳魚の現存量とチューニングVPAにより推定された1歳魚資源尾数との回帰式(チューニング後のVPAの値を用いているため、図4に示した回帰式とは若干異なる)から、調査実施年における1歳魚の資源尾数を推定し、さらにその値からVPAの後退法により前年の0歳魚の資源尾数を求めている。

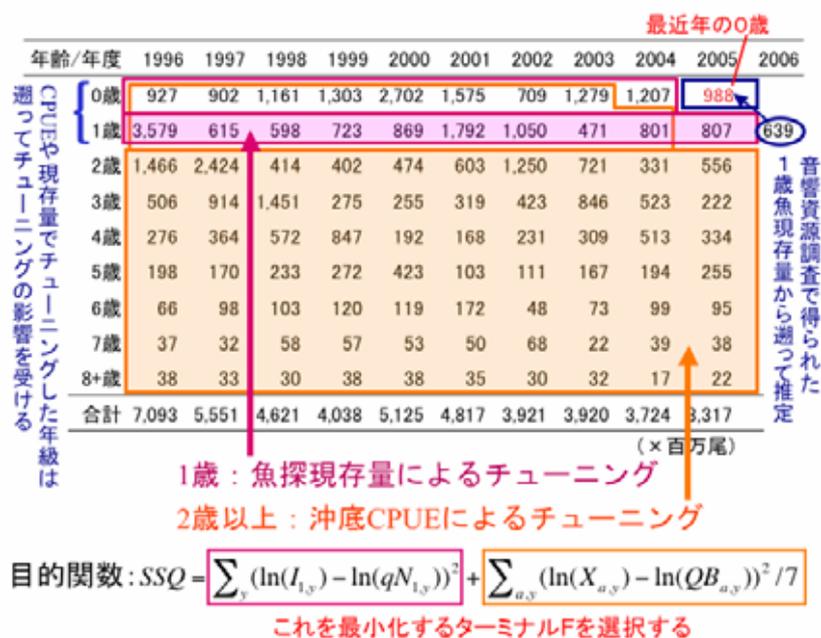


図5. コホートマトリックス(ここでは年齢別資源尾数のみを表示)における、沖底の年齢別 CPUE および音響資源調査による1歳魚現存量によるチューニングの対象年齢とその影響範囲

VPAチューニングの方法については、毎年試行錯誤を重ねながら改良を続けている。2001年度の評価では、強勢年級であった2000年級群の評価のみに、前述の方法で求めた回帰式に道東海域の1歳魚現存量を代入して求めた1歳魚資源量を直接代入していたが(八吹・本田, 2001)、2002年度以降の評価から、先に説明した、音響資源調査で求めた1歳魚現存量と2歳魚以上について求まる沖底年齢別 CPUE の双方を同時に VPA チューニングに用いる方法に変更した(八吹・本田, 2002, 2004, 2005)。また2005年度以降の資源評価では、目的関数(6.1)式における右辺第1項と第2項、すなわち音響資源調査の結果と沖底年齢別 CPUE の間の重み付け方法を変更し、現在の方

法に至っている(船本ほか, 2006)。今後も、沖底年齢別 CPUE や音響資源調査の結果得られた1歳魚の現存量推定値の VPA への取り込み方など、チューニングの方法については検討を進め、より適切な方法を探っていく。

7. 今後の課題

これまで、従来のシンプルな VPA に基づく資源評価における問題と音響資源調査のメリット、そして実際の資源解析への導入まで、順を追って紹介してきた。本調査の開始からはや十年が経過した。この間、本調査で得られる初夏の道東に分布するスケトウダラ1歳魚の現存量が、翌年秋以降に漁獲対象資源に加入する年級群の規模を(少なくとも卓越・強勢年級か、あるいは小さな年級に留まるかのレベルでは)判断する指標として利用できることが示された。この成果は、当該系群の資源解析、評価過程に取り入れられ、結果として当該資源の短期的将来予測の精度を大幅に向上させた。現在、調査の基本的な設計および作業については、ほぼルーチン化されたといえよう。

とはいえ、今後検討すべき課題もいくつか残されている。一つは、調査・解析対象海域の吟味である。前述のように、現在の調査は北方四島海域を除く北海道・東北太平洋沿岸のスケトウダラの分布範囲のほぼ全てを網羅するまでに拡大されたが、現在の資源評価に際して実際に使用しているデータは、襟裳岬以東の道東海域に分布する1歳魚の現存量推定値のみである。これは、前述の通り時系列データが長く蓄積されている海域が道東海域のみであることに起因している。2000年以降、調査海域を襟裳岬より西側の日高湾・道南海域、そして東北太平洋沿岸へと徐々に拡大していったことにより(図2)、数年後には、当該系群の分布域全体における1歳魚現存量推定値の経年データが蓄積し、シンプルな VPA から求まる資源量推定値との回帰分析が行えるようになるはずである。しかし、現実には調査終了後1ヶ月足らずの期間で、北海道～東北太平洋沿岸全域に分布するスケトウダラ1歳魚の現存量を推定し終え、その結果の全てをその年の資源評価報告書に反映させることは、現状の人員では時間的に厳しいと予想される。

これまでの結果からは、道東海域の1歳魚の現存量推定値を押さえることで、当該年級群の豊度はある程度予測できることは既に証明されている。今後、日高湾・道南および東北太平洋海域に分布するスケトウダラ1歳魚の現存量推定値のデータが溜まった段階で、それらのデータを年級豊度の推定に用いることで、どの程度の予測精度の向上が望めるかを吟味し、その作業量、調査時間等とのトレードオフの観点から、どの海域について急いでデータ解析を行い、現存量を算出し、現行の資源評価スケジュールに組み込むべきか検討する予定である。

もう一つの課題は、調査および解析作業を維持するための調査資材およびマンパワーの確保である。本調査を実施するには、計量魚探を搭載したトロール型調査船が必須であり、現在は6~7月にかけて民間調査船を40日間程度連続して傭船している。また、計量魚探機の操作やデータの保存、漁獲した魚の精密測定や簡易年齢査定を終日実施するために、総勢8名の調査員・補助調査員が

乗船して調査を遂行している。これら傭船のチャーター料および時期・期間の確保、調査機器類の購入・整備費用、また一ヶ月を超える長期にわたる航海での補助調査員の確保など、本調査の遂行に際しては相当量の予算およびマンパワーを要している。今後もこれまでと同様の規模で予算・調査船および補助調査員を確保できればよいが、予算および人員削減の折、現在の調査体制をこのまま維持していくことは、近い将来に困難になるのではないかと予想される。その意味では、現在、対象資源の全分布域を網羅すべく実施している調査対象海域を、必要最小限の範囲に絞り込むことで、調査海域、日数およびデータ数を削減するといったことも、今後は検討する必要に迫られるかもしれない。その意味でも、現在直接資源評価に利用していない海域における調査の有用性については、できるだけ早く検討を進める必要がある。

なお、本調査・研究は水産庁による「我が国周辺水域資源調査推進委託事業(我が国周辺海域資源調査等対策推進事業)」の下で実施された。

8. 文献

- Foote K. G. and Traynor J. J., 1988: Comparison of walleye pollock target strength estimates determined from *in situ* measurements and calculations based on swimbladder form. *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**, 9-17.
- 平松一彦, 1999: VPA の入門と実際. 水産資源管理談話会報, **20**, 9-28.
- 船本鉄一郎, 八吹圭三, 本田聡, 2006: 平成 17 年スケトウダラ太平洋系群の資源評価. 平成 17 年度我が国周辺水域の漁業資源評価(魚種別系群別資源評価・TAC 種)第 1 分冊, 水産庁増殖推進部ほか, 348-387.
- 船本鉄一郎, 八吹圭三, 本田聡, 2007: 平成 18 年スケトウダラ太平洋系群の資源評価. 平成 18 年度我が国周辺水域の漁業資源評価(魚種別系群別資源評価・TAC 種)第 1 分冊, 水産庁増殖推進部ほか, 345-384.
- 本田聡, 2004: 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, **12**, 25-126.
- 本田聡(編), 2004: 水産音響資源調査マニュアル. 水研センター, 68pp.
- Pope J. G., 1972: An investigation of accuracy of virtual population analysis using cohort analysis. *Res. Bull. Int. Commn. NW Atl. Fish.*, **9**, 65-74.
- Sawada K., Furusawa M., and Williamson N. J., 1993: Conditions for the precise measurement of fish target strength *in situ*. *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.*, **20**, 73-79.
- 志田修, 2002: 北海道東部太平洋海域におけるスケトウダラの年齢別分布水深. 北水試研報, **63**, 9-19.

八吹圭三, 本田聡, 2001: 平成 13 年スケトウダラ太平洋系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価(魚種別系群別資源評価), 水産庁増殖推進部ほか, 132-146.

八吹圭三, 本田聡, 2002: 平成 14 年スケトウダラ太平洋系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価(魚種別系群別資源評価), 水産庁増殖推進部ほか, 136-153.

八吹圭三, 本田聡, 2004: 平成 15 年スケトウダラ太平洋系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価(魚種別系群別資源評価・TAC 種)第 1 分冊, 水産庁増殖推進部ほか, 287-323.

八吹圭三, 本田聡, 2005: 平成 16 年スケトウダラ太平洋系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価(魚種別系群別資源評価・TAC 種)第 1 分冊, 水産庁増殖推進部ほか, 304-339.