

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

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 水産総合研究センター
	公開日: 2024-10-02
	キーワード (Ja):
	キーワード (En): walleye pollock; Theragra chalcogramma; Japanese Pacific population; acoustic survey; abundance estimation
	作成者: 本田, 聡
	メールアドレス:
URL	所属: 北海道区水産研究所
	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2010812

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



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^{*1}

本田 聡^{*2}

Abundance estimation of the young cohorts of the Japanese Pacific population of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) by acoustic surveys^{*1}

Satoshi HONDA^{*2}

Abstract The Japanese Pacific population of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*), which is distributed widely along the Pacific coast of Hokkaido and Tohoku, is one of the most important fishery resources in Japan. One of the features of this population in recent years is the occasional occurrence of dominant year classes. Once a strong year class occurs, this cohort accounts for the greater part of the age composition in this population and subsequently sustains good catches for several years. Recognizing the sign of the occurrence of a strong year class as soon as possible before its recruitment is an effective measure to assess the consequent quantitative situation of this population in the years ahead. Quantitative echo sounder has been well developed as one of the oceanographic observation equipments during last few decades; it is widely used for direct stock estimations of marine organisms at present. In this study, hydroacoustic surveys were applied for the quantitative evaluation of young cohorts of the Japanese Pacific population of walleye pollock, which had not evaluated by the orthodox method of stock analysis because of their pre-recruitment size.

Optimum conditions and the seasons to accomplish the acoustic survey are presented from the viewpoint of the features of the survey equipment and other conditions to conduct the surveys. The attenuation of acoustic energy due to the effects of sailing was measured on the R/V Kaiyo-maru No. 3, which was used for the acoustic survey cruises. The attenuation by sailing appeared with the increase of the ship speed. In particular, the attenuation was apparent under the head sea condition of sailing; maximum attenuation was attained 1.3dB at 38kHz, 0.7dB at 120kHz. Furthermore, the attenuation by sailing occurred at slower sailing speeds than that at which the apparent attenuation was recognized on the echogram. This means that the attenuation by sailing exerted an influence upon the acoustic data without the operator being aware of it. On the planning of the acoustic survey by the R/V Kaiyo-maru No. 3, setting the sailing direction in a following sea will prevent the underestimation of the acoustic biomass index caused by the attenuation by sailing. Considering the weather conditions, various kinds of fisheries activities that would obstruct the grid surveys or trawl towing, and the overall schedule of the stock assessment of this population, early summer (June till July) was proposed as the optimal

2004年5月24日受理 (Received on May 24, 2004)

^{*1} 北海道大学審査学位論文 (投稿するに際し投稿規定に添って一部修正した)

^{*2} 北海道区水産研究所 〒085-0802 北海道釧路市桂恋116 (Hokkaido National Fisheries Research Institute 116 Katsurakoi, Kushiro, Hokkaido, 085-0802, Japan)

season for the acoustic survey aimed at juvenile pollock in the Pacific coast of Hokkaido.

Distribution, ecology and the estimation of the standing stock at age of walleye pollock was described by the combined acoustic and trawl surveys conducted on the continental shelf and slope area in the Pacific side of Hokkaido from Jun. 1996 to Jan. 2002. The shoals of the young cohort of walleye pollock often occurred on the continental shelf area of the offshore southeastern Hokkaido. Apparent diel vertical migration of pollock appeared in every season and whole age groups. The range of the vertical migration varied with age/size and season. Since the echo sounder has acoustical invisible zones both in the surface and the off bottom area, diel or seasonal variation of the swimming layer would cause the fluctuation of the stock estimation. Seasonal variation of the abundance estimation was wider than the diurnal variation; estimated standing stock in early summer was always larger than the results based on the data taken in winter. Emigration of the fish shoals from the survey area, underestimation caused by the bottom acoustic deadzone, increasing of the acoustic attenuation by sailing under rough weather, were assumed as the potential causes for the decrease of estimated abundance in winter. For young cohorts of pollock in early summer, acoustically estimated abundances based on the daytime survey were always larger than those based on nighttime survey. Surfacing of fish shoals toward the undetectable surface layer by echosounder in nighttime was considered as the main cause of the more conservative abundance estimation.

Correspondence of the structure of walleye pollock shoals to the habitat conditions was investigated. In the present procedure of the allocation of acoustic energy from the pollock shoals to each age group, both age composition and the average sizes at age of each pollock shoal, taken from the trawl operations, are indispensable parameters. If we estimate both parameters of pollock shoal structure using the information of their habitat location instead of the numbers of trawl tows, we could reduce the effort for conducting trawl operation. The same as other demersal fishes, an age-dependent bathymetric pattern was observed; age composition biased younger in shallower coastal area, then gradually become older with the depth increasing. Furthermore, average sizes at same cohort also tended to be larger in proportion to the increasing depth. Using these relationships as regression functions, the age/size structures of walleye pollock shoals were estimated from their distribution depth and the area was then compared to the real structures of pollock shoals taken by trawl tows. Although the average size at age in the pollock shoal was well reproduced and matched with the real data, the age-composition ratio could not be reproduced from the regression function of the depth. Particularly, since the age-1 cohort appeared patchily on the shallower half of the continental shelf, a simple regression function explained by the depth and area could not well describe their elusive distribution pattern. This negative result consequently confirmed the need of direct biological sampling with the acoustic survey simultaneously for interpretation of the acoustically detected fish shoals.

Geostatistics was applied to evaluate the precision of the abundance estimation and the optimal transect interval for the acoustic surveys. By applying geostatistics, standard error of mean (SEM) of the estimator was extensively reduced. This was caused by the existence of the autocorrelation among the data taken from the neighboring transects. If applying the orthodox statistics into the systematic parallel transects survey design, it neglects the autocorrelation among the neighboring data and regards them as mutually independent. Therefore, applying orthodox statistics into the systematic parallel transects

survey design overestimated the variance of the abundance consequently. Although the point estimator itself was not varied regardless of the statistical method, applying geostatistics could show the correct level of variance of the estimator. Results of the simulation of varying the transect interval showed that narrowing the intertransect distance would improve the precision of the abundance estimation of young cohorts of pollock. However, narrowing the transect interval increased the total survey distance and therefore the necessary time to run. Considering the expansion of the survey area and the allowable shiptime, the present transect distance of 8 nautical miles was regarded as practical to accomplish the whole survey with an acceptable level of precision.

In the case of young cohorts of pollock such as age-1 to -3, significant positive regression line was fitted on the correspondence between the acoustically estimated standing stock at age off southeastern Hokkaido (the Doto area) and the total abundance at correspondent cohort derived by VPA analysis a few years later. These results meant that the acoustically estimated standing stock of young cohorts of walleye pollock in the Doto area well reflected the total magnitude of these cohorts in the whole distribution, despite the Doto area is just a part of the whole distributional area of this population. By applying these regression functions, the total abundance of the young cohorts those have not been recruited or have just recruited recently can be forecast immediately. That is, the acoustic survey for young cohorts of pollock well complement the weak point of VPA on the process of the fish stock evaluation.

Key Words: walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, Japanese Pacific population, acoustic survey, abundance estimation

目 次	
緒 言	第 4 章 音響資源調査における空間統計学の適用
第 1 章 音響資源調査法の原理と現存量推定誤差	4.1 1-D Transitive 法による年齢別現存量の標準誤差の推定
1.1 音響資源調査法の原理と現存量推定における誤差要因	4.2 1-D Transitive 法による調査定線間隔の最適設定
1.2 機器類および調査船の特性に起因する誤差要因	第 5 章 音響資源調査によって得られた現存量推定値の妥当性の検討
1.2.1 計量魚探機の較正および特性の把握	第 6 章 総合考察
1.2.2 調査船から発生する雑音の影響	6.1 音響資源調査の最適設計のために考慮すべき要因
1.2.3 航走減衰および気泡減衰	6.2 スケトウダラ若齢魚群の分布生態および現存量推定結果についての考察
1.3 調査時期および海域に起因する誤差要因	6.3 音響資源調査によるスケトウダラ現存量推定の今後の展開と課題
1.3.1 気象・海象	要 約
1.3.2 定線航走および漁獲試験が容易な時期の選定	謝 辞
1.3.3 ABC算定のための時間的制約	文 献
1.4 考察	
第 2 章 北海道太平洋沿岸におけるスケトウダラの分布特性と年齢別現存量推定	
第 3 章 魚群の分布位置情報に基づく年齢組成・年齢別体長組成の推定および魚群反応の年齢分解	

緒 言

スケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) は、北海道周辺における漁獲対象資源として最も重要な魚種の一つである。北海道周辺海域に分布するスケトウダラは、その分布海域から、北部日本海系、北見沖合系、根室海峡系、太平洋系の4つの系群に分類される(辻, 1979)。1980年代以前は、各系群ともそれぞれ数十万トンに上る高い漁獲量をあげていたが、1980年代後半以降、北部日本海系、北見沖合系、根室海峡系の3系群については漁獲量が激減し、現在は北部日本海系が5万トン前後、北見沖合系および根室海峡系は1万トン前後と極めて低い水準で推移している(八吹, 2001a, 2001b, 2001c)。一方、太平洋系群における漁獲量の推移は、1970年代から現在まで緩やかな上下動を繰り返しながらも15~30万トンの水準を維持している(八吹, 本田, 2001)。

太平洋系群は、北は択捉島沖から北海道東部太平洋(以下道東海域と表記)、日高湾の沿岸、東北太平洋岸

を経て、銚子の沖に至る広範な分布域を持つ(Fig. 1, 八吹, 本田, 2001)。分布域内には複数の産卵場の存在が示唆されているが、近年においては北方四島周辺、道東海域および仙台湾の産卵場はいずれも小規模で年変動も大きく、資源への貢献はそれほど大きくないものと考えられている(小林, 1985; 濱津, 八吹, 1995; 服部ら, 2001)。一方、毎冬噴火湾湾口部に形成される産卵場は、系群内で最も規模が大きく、かつ毎年安定して形成され、太平洋系群における新規加入群の主たる供給源と考えられている(Nishimura *et al.*, 2002)。

孵化後数ヵ月を経過し、着底生活に移行したスケトウダラ幼魚が分布する海域としては、以前より0歳魚が漁獲される東北太平洋岸が知られていた(小林, 1985)。1980年代以降、複数の調査船調査により、夏から秋にかけての道東海域の浅海域にスケトウダラ幼魚が大量に分布していることが明らかとなった(Miyake *et al.*, 1996; 志田ら, 1999; Nishimura *et al.*, 2002)。このスケトウダラ幼魚の耳石日周輪を解析した結果、これら道東海域に分布する幼魚の大半は、噴火湾湾口

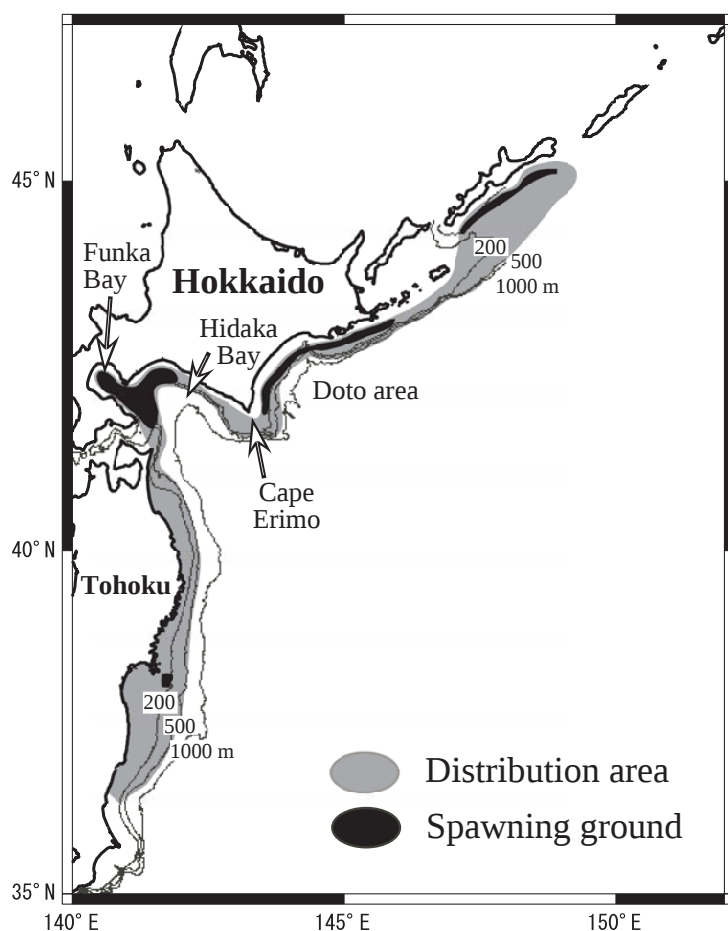


Fig. 1. Schematic figure of the distribution and spawning grounds of the Japanese Pacific stock of walleye pollock. Reproduced from Yabuki and Honda (2001) with minor revision

部産卵場で産まれた個体である可能性が示唆されている (志田, 西村, 2002; Nishimura *et al.*, 2002)。

道東海域へ到達したスケトウダラ幼魚は、成熟までの数年間を道東陸棚域で過ごす。この際に、未成魚は道東海域における沖合底びき網漁業 (沖底) の主要漁獲対象として利用されている (小林, 1985; 八吹, 2000)。

スケトウダラ太平洋系群では、満4歳の冬に大半の個体が成熟し、産卵に参加する (八吹, 本田, 2001)。標識再捕調査の結果、次の冬に成熟に達する個体は、秋以降に道東海域から噴火湾湾口部産卵場に移動することが示された (吉田, 1987)。これらの産卵親魚は噴火湾周辺の沿岸刺し網漁業によって利用される。さらに、冬季に噴火湾湾口部で産卵した成魚が、夏季には再び道東海域へ戻る (吉田, 1987)。未成魚期を道東海域で過ごしていたスケトウダラが、産卵のためにわざわざ道東海域から噴火湾湾口部まで移動し、産卵後に再び道東海域へ戻って摂餌するという回遊パターンは、スケトウダラ太平洋系群にとって、産卵場としての噴火湾湾口部の、また成育場・摂餌場としての道東海域の重要性をそれぞれ示しているといえる。

近年のスケトウダラ太平洋系群の特徴として、数年

間隔での卓越年級の発生が挙げられる。卓越年級とは、加入までに生き残った個体数が他の年に比べて特別に多い年の年級を指す。Fig. 2 に、1981年以降のスケトウダラ太平洋系群における年齢別資源尾数および年齢別資源重量の推移を示した (八吹, 本田, 2001)。最近では、1995年に例年の2~6倍に相当する約60億尾におよぶ0歳魚が生残して卓越年級を形成した。この1995年級は、高い年級豊度を保ちつつ漁獲対象資源に加入し、その後数年にわたりスケトウダラ太平洋系群の好漁を一手に支える役目を果たした。もし仮に、1995年級が卓越年級ではなく例年と同程度の加入量に留まっていたならば、1990年代後半以降の太平洋系群は、他の3系群と同様に低い資源水準で低迷していたかもしれない。このように、スケトウダラ太平洋系群の場合、新規加入群量が卓越年級であるか否かは、その後の資源動向に大きな影響を与える非常に重要な要素である。

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4系群もすべて対象魚種となった。TAC制度下では、持続可能な資源の

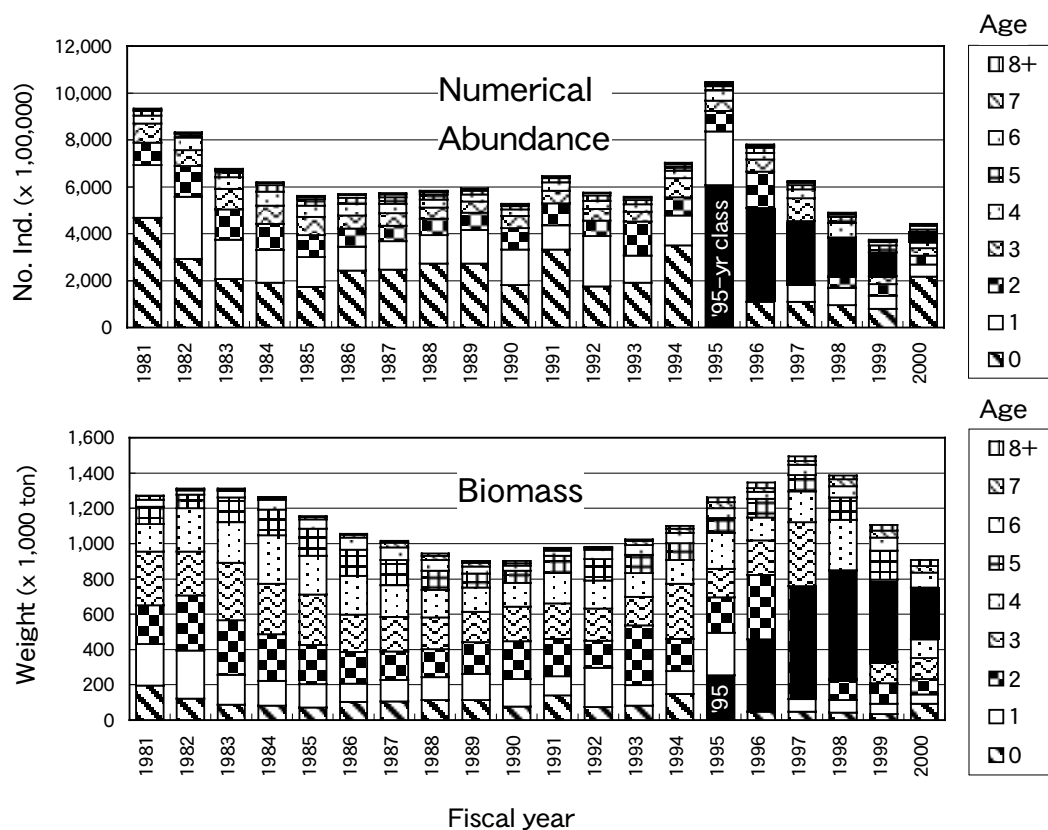


Fig. 2. Age composition of the Japanese Pacific stock of walleye pollock in the past 20 years; upper: numerical abundance, lower: biomass. Reproduced from Yabuki and Honda (2001) with minor revision. The cohort in black shading indicates the latest dominant year class hatched in 1995

管理を目的として、魚種ごと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。その設定にあたって重要な参考値となるのが生物学的許容漁獲量 (Allowable Biological Catch, ABC) である。ABC は、再生産に必要な親魚を残しつつMSYを達成する漁獲量として求められる (水産庁, 2001)。ABCの算出には将来の資源量の予測が必要であり、そのためには漁獲対象資源の年齢組成や再生産関係、成長、生残、成熟率、成熟サイズなど、対象生物における多くの生物学的パラメタが要求される。そして、各重要水産資源についてこれらのパラメタを推定し、それらに基づいて適切なABCを算出することが、水産研究所の主要な業務の一つとなった。

現在、水産研究所においてスケトウダラの資源解析に用いられている方法は、Virtual Population Analysis (VPA) である。VPAでは年齢別漁獲尾数を用い、漁獲による獲り減らし量と自然死亡量を見積もりながら芋づる式に年級を過去に向かって遡りつつ、漁獲死亡係数 F と年齢別資源尾数の双方を推定する (Pope, 1972)。この方法の利点は、漁獲努力量を用いずに計算が可能な点である。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できる。また、遡る年数が多くなるほど、推定の精度は向上する。しかし、このことは逆算段階が少ない近年の推定値においては、推定精度が低くならざるを得ないことを意味する。

VPAを過去に向かって遡り、過去の年齢別資源尾数を計算した後、漁獲死亡係数 F を仮定した上で未来に向けて計算を進めていく (前進コホート) と、将来の年齢別資源尾数を計算することができる。この際、新規加入群量についてはVPAから求めることができないので、将来の親魚資源量をVPAを用いて推定し、その値を再生産関係に代入することによって新規加入群量を推定する (八吹, 本田, 2001)。しかし、スケトウダラ太平洋系群の場合、この方法による将来の資源豊度の予測には問題がある。

産卵親魚量と新規の加入尾数の間に一定の関係が当てはまるような魚種については、現在の親魚資源量から将来加入する年級の豊度を予測することが可能である。しかし、スケトウダラ太平洋系群の場合には、再生産関係に一定のモデルをあてはめることは難しく (八吹, 本田, 2001)、親魚資源量から新規加入群量を精度良く推定することができない。そのため、発生後の年級豊度をできる限り早い段階で把握し、それが漁獲対象資源に加入する前に資源評価に反映させることが求められる。最も早く資源を利用する東北海域の沖

合底びき網漁業 (沖底) では、0 歳から 3 歳程度の未成魚までを対象とした操業を行っている。しかし、東北海域の沖底による 0 歳魚の漁獲量の動向と、翌年以降に東北・北海道太平洋海域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困難である (八吹, 本田, 2001)。一方、道東海域における沖底からは、2 歳魚以上の未成魚および成魚の漁獲物データが得られるものの、このときには既に新規加入群として主たる漁獲対象資源に加入した後の情報を収集することになる。漁獲データが 2 歳魚の段階で得られたとしても、その漁獲量が統計として集計されるのは翌年度である。さらに、そのデータを用いて予測するABCがその一年後の値であることを考慮すると、魚が漁獲されてから予測に用いるまでの間に 2 年のタイムラグが発生する。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ことから、高精度の予測値を得るためには、2, 3 年間データの蓄積を待つ必要がある。これでは、VPAで精度の良い年級豊度が分かった時には、既にその年級は主たる漁獲対象年齢として利用され、あるいはそのピークを過ぎてしまっており、加入前に年級豊度を予測するという目的とはかけ離れてしまう。このように、漁獲データを用いて資源評価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加入前の段階で予測し、ABCに反映させることは困難である。これは、新規加入群の年級豊度によってその後の資源動向が大きく左右されるスケトウダラ太平洋系群にとっては非常に大きな問題である。

そこで、本研究ではVPAによる資源豊度推定では把握が困難な新規加入群量を推定する手法として、短時間で広い面積を調査することが可能な音響資源調査の導入を検討した。音響資源調査によって、漁獲対象資源に加入する以前の、あるいは加入直後の若齢魚における年級豊度を把握することができれば、VPAでは十分な検討が困難であった、加入直後あるいは加入前の若齢魚における年級豊度の指標を得ることが可能となり、翌年以降の資源評価に適用できる。

本論文では、計量魚群探知機 (以下、計量魚探機と表記) を用いた北海道太平洋側海域におけるスケトウダラ若齢魚の年齢別現存量評価手法の確立を目標として、以下の研究を行った。

まず第 1 章において、音響資源調査の原理と、現存量推定の過程における誤差の要因について整理し、実際の調査に用いる調査機器、調査船の特性及び調査の実施に必要な条件の把握を行った。調査機器および調査船の特性には、計量魚探機の経年変化の有無、船が

発する雑音の影響および航走減衰などが、また調査の実施に必要な条件としては、気象・海象、調査の障害となりうる要因、さらに調査の成果の受け渡し先であるABC算定のスケジュールなどが含まれる。

第2章では、音響資源調査の実施において必要な、北海道太平洋側海域におけるスケトウダラ若齢魚の分布生態の把握および年齢別の現存量推定を試みた。本来ならば、年齢別の分布、季節移動・回遊パターン、さらには日周鉛直移動など、音響資源調査の結果に大きく影響を与える生態的特徴については事前に十分な検討を行った上で、その結果に応じて適切な調査設計を行い、改めて現存量推定が行われるべきである。しかし、本研究で対象とした北海道太平洋側海域におけるスケトウダラ若齢魚、特に漁獲対象資源に加入する前の幼魚期における分布生態については、これまで十分な知見が得られていない。そこで、本研究では分布生態の把握と量的調査とを並行して実施し、その結果を相互に反映させながら調査設計の改善を図った。

第3章では、魚群反応の年齢分解法についての新たな方法の検討を行った。魚群の分布位置における水深や東西方向などの環境要因から道東海域内の特定的位置におけるスケトウダラの年齢組成および年齢別平均尾叉長を再現する方法を検討するとともに、その結果に基づいて魚群反応を各年齢に分解する方法の妥当性について考察した。

第4章では、空間分布構造を扱う統計学の一種である空間統計学 (Geostatistics) をデータの解析に適用し、現存量推定値の精度評価および調査設計、特に定線間隔の設定に関する考察を行った。

第5章では、第2章で得られたスケトウダラ若齢魚群の年齢別現存量推定値を、既存の情報と比較し、その妥当性について検討した。

最後に、第6章では、それまでの章で得られた結果をまとめ、総合的な考察を行うとともに、北海道太平洋側海域におけるスケトウダラ若齢魚群の音響学的調査方法の最適設計への提言を行った。

第1章 音響資源調査法の原理と現存量推定誤差

1.1 音響資源調査法の原理と現存量推定における誤差要因

計量魚探機による現存量推定では、水中に超音波を発し、対象物に当たって散乱して戻ってくる音の強さ (インテンシティ) を魚1個体あたりの後方散乱断面積で除算することにより、分布する魚の個体数を推定する。なお、これ以後に登場する諸係数の表記にあつ

ては、MacLennan *et al.* (2002) に従った。まず、水中に設置した送受波器から放射された音波が、1個体の魚に当たって散乱し、その一部が再び送受波器によって捉えられた場合を想定する。この場合、そのエコー強度は後方散乱断面積 (Backscattering cross section, σ_{bs})、あるいはその常用対数を取りdB表記したターゲットストレングス (Target Strength, TS) とよばれる。探知体積内に複数の個体が分布した場合には、各々の個体によって散乱された音波が送受波器によって捉えられることになる。これを単位体積1 m^3 あたりのエコー量として示した値が体積後方散乱係数 (Volume backscattering coefficient, s_v)、あるいは体積後方散乱強度 (Volume backscattering strength, S_v) と呼ばれ、 $s_v = \frac{\sum \sigma_{bs}}{V}$ および

$S_v = 10 \log_{10}(s_v)$ で表される。ここで、Vは散乱体積を示す。さらに、これらの値を水柱分足し合わせ、水面1 m^2 あるいは1平方カイリあたりのエコー量に換算した値は、面積後方散乱係数 (Area backscattering coefficient, s_a or s_A) と呼ばれ、 $s_a = \int_{z1}^{z2} s_v dz$ あるいは

$s_A = 4\pi(1852)^2 s_a$ で示される。現行の計量魚探機において魚群量を示す指標値として出力される値は、上述の4種類の値のいずれかである。これらの値を、各魚群反応に含まれる対象生物の σ_{bs} 、あるいはTSの平均値 (本論文ではそれぞれ $\overline{\sigma_{bs}}$ および TS_{AVG} と表記) で除算することにより、エコー量として求められた魚群反応が実際の尾数に換算される。それを調査海域全体で合算し、引き延ばすことによって現存量推定値が求められる。

上述したエコー量の指標値である s_v や S_v 、あるいは s_a 、 s_A を求める際、音波の拡散や吸収に伴う減衰を正確に補正することが求められる。前者については、計量魚探機内に内蔵されるTVG (Time Varied Gain) 回路がその役割を果たしており、これについてはユーザや調査による調整の余地はない。一方、吸収減衰の大きさは、測定環境における水温や塩分濃度および使用する周波数によって大きく異なるため (Francois and Garrison, 1982)、調査環境における平均水温および塩分を把握し、適切な補正係数を計量魚探機に入力する必要がある。ただし、一般に魚を対象とした調査で用いられる周波数38kHzでは、周波数120kHzあるいはそれ以上の高周波に比べると吸収減衰の変動幅は小さく (Francois and Garrison, 1982)、調査海域内の水温や塩分の分布幅がよほど広くない限りは、調査前に適切な値を入力すれば、それほど大きな誤差要因にはならない。

一方、データ収録時における誤差あるいは計測の障害となる要因としては、雑音および航走減衰を挙げることができる。雑音は、船の航走に伴う雑音と電気的な雑音の2種類がある。これらは、単にエコーグラムを見づらくするのみならず、対象物の散乱強度に上乘せされることによって過大推定を引き起こしたり、また探知可能水深を制限したりと、音響資源調査に悪影響を与える。また航走減衰は、船の航走時に発生する気泡が送受波器の直下を通過することにより、送受波される音波が気泡によって減衰され、現存量の過小推定を引き起こす。船によっては3～5 dBもの減衰が発生することもあり（古澤、宮野鼻, 1983）、音響資源調査に使用する調査船については、少なくとも一度は航走減衰の計測を行い、許容される航走船速を把握したうえで調査設計を行うことが望まれる。

対象生物の生態的特性に起因する推定誤差も存在する。音響資源調査では、その機器の特性上、送受波器の直下に当たる表層域および海底の直上の層については、対象生物が分布していてもそのエコーを正確に捉えることができない表層デッドゾーンおよび海底デッドゾーンと呼ばれるものが存在する（Aglen, 1994）。そのため、日周鉛直移動を行う魚種を対象とした調査を行う場合には、その時間帯や季節によって魚群分布層がデッドゾーンに重なり、現存量が過小推定される危険性がある。また、音響資源調査は、対象海域に対して一定の間隔で調査定線を設定し、その上を調査船で走査することによって行われることが多いが、調査定線の間隔をどの程度に設定するかも、現存量推定値の誤差に関係する。定線間隔を広く設定すれば、調査密度の低下に応じて現存量推定値の誤差は拡大する。しかし、必要以上に細かく定線間隔を設定すると、定線航走に多大な時間をとられ、一定期間内に網羅することが可能な海域面積の減少をもたらす。できる限り短期間に広い海域を走査し、かつ現存量推定の精度を高く保つためには、対象とする魚群の分布パターンを考慮した、適切な調査密度の設定が求められる。

得られたエコー量を実際の尾数に換算する際のスケールファクターとなるスケトウダラの σ_{bs} あるいはTSについては、現在は年齢別に平均尾叉長を計算し、その値をFoote and Traynor (1988) が求めた尾叉長とTSの関係式に代入して求めている。しかし、この関係式が北海道太平洋側海域に分布するいずれの場所、季節、時間帯あるいは体サイズのスケトウダラにおいても共通して有効なものかどうかについては、必ずしも現時点では明らかでない。仮に、TSそのものに変動や誤差が生じた場合には、現存量推定値にも大きな影響を及ぼすことが予想される。

さらには、現状では計量魚探機で得られる情報のみを用いて魚群反応の魚種やサイズ組成を正確に把握することは困難であり、対象魚種以外の魚種が同所的に分布した場合には、魚種の誤認による現存量推定誤差の発生も考えられる。

このように、音響資源調査における現存量推定の誤差要因には様々な要因が考えられるが、以下の節では、このうち測器類および調査船の性能あるいは特性に関連する誤差要因について明らかにする。なお、スケトウダラの生態学的特徴に起因する誤差要因については第2章で、また定線配置と推定誤差の関係については第4章にて扱う。

1.2 機器類および調査船の特性に起因する誤差要因

音響資源調査では、出力結果が常に魚群分布量を正確に反映していることが前提となる。したがって、使用する計量魚探機が適正に調整されていることはもちろん、調査船の持つ特性を事前に把握しておき、最適な条件下で航走できるように調査を設計、実施することが必要とされる。計量魚探機の送受信系は、標準球やハイドロフォンを用いた較正によって事前に調整する。また、自船が発する雑音の程度と船速あるいはエンジン回転数との関係を調べ（雑音測定）、さらに航走減衰の発生状況を把握した上で、雑音の少ないエンジン回転数や航走減衰の発生しない航走速度を前提として調査を設計、実施することも、調査精度の向上に大きく寄与する（Mitson, 1995）。

本調査で主に用いた日本海洋株式会社所属の第三開洋丸は、1978年建造のトロール船（473.65トン、690馬力）で、1995年5月にシムラッド社製計量魚探機EK-500が装備された。搭載されている周波数は38kHzと120kHzの二種類で、送受波器は左舷前方の船底タンクに、船底から下に約60cm突出する形で取り付けられている（Fig. 3）。また本船の航行において、船速の調整にはエンジン回転数とプロペラピッチの両方を操作する方式を採用している。本項では、本調査で用いた第三開洋丸と、同船に搭載されている計量魚探機EK500の組みあわせにおける音響調査に関連する諸条件についての測定結果から、機器・調査船の特性を明らかにするとともに、本船において音響資源調査を行う際の適切な調査法の提示を試みた。

1.2.1 計量魚探機の較正および特性の把握

計量魚探機は、CTD（conductivity-temperature-depth meter; 電気伝導度水温深度計）等の他の海洋測器同様に、較正が必要な観測機器である。機器類は

船上で常時海塩粒子を含む高湿の空気に曝され、また送受波器は常時海中に没している。このように過酷な条件下での運用を求められることから、長年にわたる調査の間に、付着物や部品の劣化などによる性能の変化も想定される。よって、高精度の調査の実施には、適切な保守作業を含む機器の性能・状態の把握と、正確な校正作業が必要である。特に、音響資源調査では分布密度を面積で引き延ばすという特性上、計量魚探機の出力する反射強度がほんの少し真値からずれるだけで、推定現存量が大幅に変動することは十分に考えられる。したがって、計量魚探機の校正は音響資源調査において最も重要なプロセスの一つである。

本研究で扱うスケトウダラ音響データは、1996年から2001年までに実施された音響資源調査によって収集されたものである。このうち1996年度の調査では、調査毎に異なる調査船、異なる計量魚探機を用いたが、1997年12月以降は、全て第三開洋丸およびそれに搭載されている計量魚探機EK-500を用いて調査を実施した。本項では、この第三開洋丸における音響資源調査時に実施した計9回の標準球校正の結果について示す。

方 法

計量魚探機の校正は、釧路港沖、函館港沖および北海道厚内沖の水深約32~73mの地点で実施した。測定は古澤ら(1995)の方法に従って実施した。すなわち、船底の送受波器の取り付け位置を囲むように両舷側の3箇所から垂らしたテグスの先に、直径が60.0mm(38kHz用)および23.0mm(120kHz用)の銅製標準校正

球を吊り下げ、それを船底から海底までの距離の中間付近の深度で、かつ船底下送受波器の主ビーム内に配置するよう調節した後、校正球の音響散乱強度を測定し、理論TSとの差を補正した。測定項目は、38および120kHzのそれぞれにおけるTSゲインおよび S_v ゲインの4つである。本来アンプゲインはTSモード、 S_v モードとも同じ値を使うが、EK500ではそれぞれのモードで別々にアンプゲインを調整する(Simrad, 1993)。また、CTDにより校正現場における船底から校正球までの平均水温および塩分を測定し、それらの値から吸収減衰係数 α 、水中音速および校正球の理論TSを求めた。吸収減衰係数 α と水中音速は、Francois and Garrison(1982)の計算式を用いて算出した。また校正球のTSはEK500のマニュアルに従って求めた(Simrad, 1993)。校正球の理論TSは音速によって若干変化するが、音速を1490m/sと仮定した場合の理論TSは、それぞれ-33.6dB、-40.4dBである。それぞれの校正球の大きさは、音速の変化によるTSの変動ができる限り小さくなる径に設定してあるため、多少水温や塩分が変動し、水中音速が変化しても、実際のTSの変動は極めて小さい。

結果および考察

1997年12月から2002年1月までの約4年間にわたるアンプゲインの変化をTable 1およびFig. 4に示した。アンプゲインの変化の幅は、38kHzではTSモードで1.2dB、 S_v モードで2.2dB、120kHzではTSモードで3.0dB、 S_v モードで2.2dBであった。両周波数ともに、2000年1

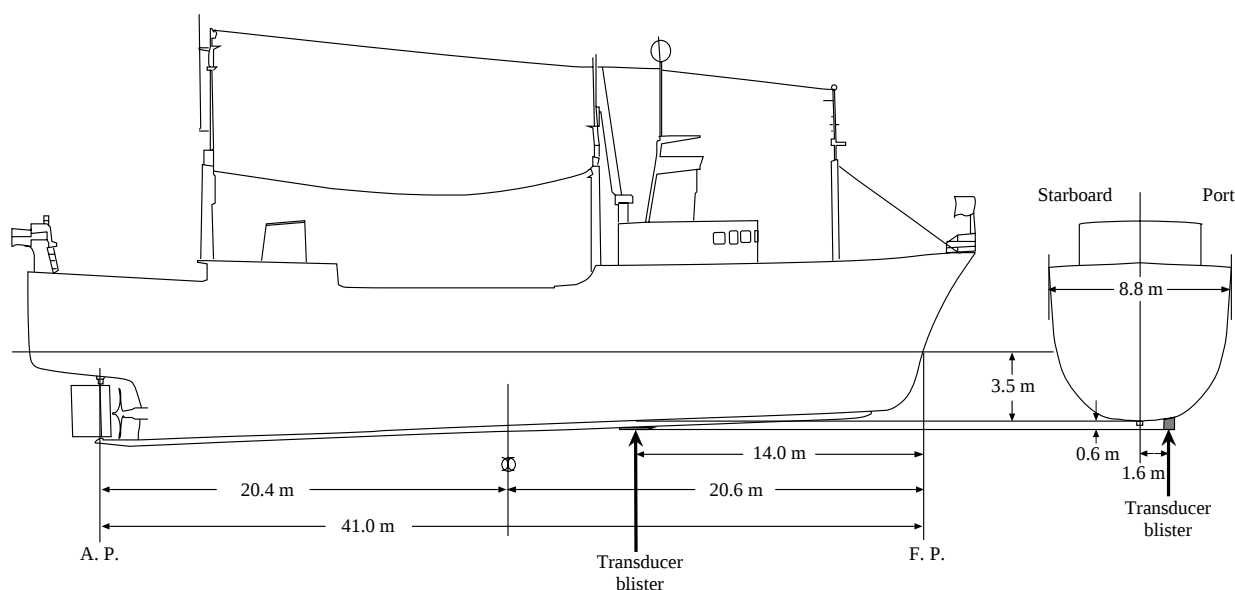


Fig. 3. Schematic side and section views of R/V Kaiyo-maru No. 3

月以降の S_V モードにおけるアンプゲインの変動が大きいこと、また2000年6月以降120kHzのTSモードにおけるアンプゲインが一貫して低下傾向にあることが明らかになった。TSモードでの測定では、校正球以外の対象物を同時に捉えてしまう危険は少ないが、 S_V モードでの測定では、測定海域の状態、特に気泡や懸濁物などによって散乱強度が変化しやすいと考えられる。よって S_V モードにおけるアンプゲインの変動幅がTSモードにおけるそれよりも大きくなることは容易に考えられる。一方で、120kHzのTSモードにおけるアンプゲインが2000年6月以降一貫して減少傾向にある点については、この間、計量魚探機あるいは送受波器への改造、交換などの作業は行われていないことから、機器の経時的な変化とも考えられる。しかし、実際の

調査においては、事前の校正によりその都度適正なゲインに調整されているものと判断し、そのまま調査に用いた。

校正を実施した時期と海域によって平均水温は大きく異なっていた。1997年12月から1999年6月までの校正時は8～13℃、2000年1月以降に行われた校正時には1～5℃と、調査の前半と後半とで水温の高い中での校正と低い中での校正の2つに大別された。しかしながら、校正時の水温に対応したアンプゲインの変化は特に観察されず、水温による送受波器の感度変化はないものと考えられた。

1.2.2 調査船から発生する雑音の影響

航走雑音とは、船の航走によって発生する水中雑音

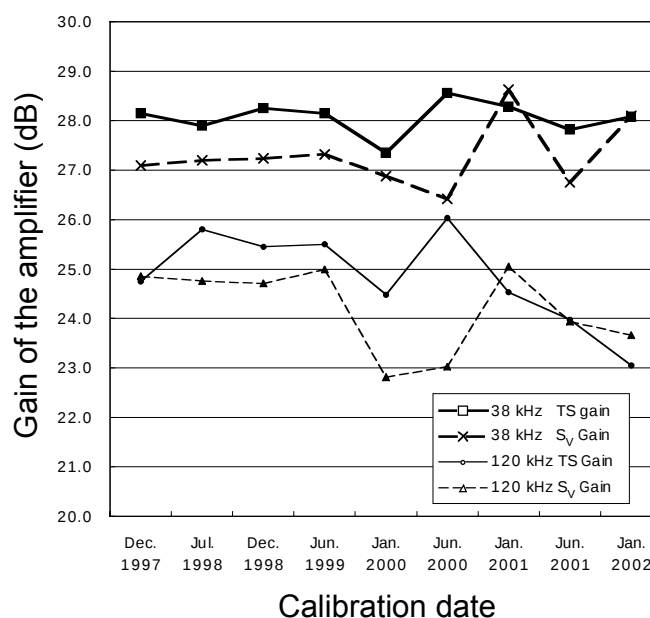


Fig. 4. Variation of the gain of the amplifier of EK-500, onboard of Kaiyo-Maru No. 3

Table 1. Date and the position of the standard sphere calibrations of EK-500 onboard of Kaiyo-Maru No. 3, and the gain of the amplifier at each calibration

Date	Position	Sea Depth (m)	Avg. Temp. (deg.)	Avg. Sal.	Sound speed (m/s)	Amp. Gain (dB)			
						38kHz		120kHz	
						Cal. TS	Cal. SV	Cal. TS	Cal. SV
Dec. 1997	Off Kushiro Port	32	8.0	-	1490	28.15	27.09	24.75	24.85
Jul. 1998	Off Kushiro Port	-	12.3	32.3	1495	27.90	27.20	25.80	24.76
Dec. 1998	Off Hakodate Port	40	10.8	33.4	1495	28.25	27.24	25.45	24.71
Jun. 1999	Off Hakodate Port	50	12.7	33.9	1497	28.15	27.32	25.50	24.99
Jan. 2000	Off Kushiro Port	50	3.0	32.5	1456	27.35	26.88	24.48	22.81
Jun. 2000	Off Atsunai	56	4.6	32.3	1465	28.56	26.42	26.03	23.03
Jan. 2001	Off Kushiro Port	73	1.0	32.4	1454	28.28	28.63	24.53	25.05
Jun. 2001	Off Kushiro Port	-	3.1	32.7	1461	27.82	26.75	23.98	23.94
Jan. 2002	Off Kushiro Port	77	1.0	32.2	1454	28.08	28.10	23.05	23.66

が送受波器に捉えられることによって起こる問題である。主たる雑音源はエンジンおよびプロペラにある場合が多く、周波数によって雑音の出現度合いも大きく異なる。測定は、水深の深い場所において計量魚探機をパッシブモード（送波を行わず、受波のみ行う）にし、船速を変えながら受波を行った。送波を行わないにも関わらず、何らかの様な反応が深い側から映り出した場合、それを自船の航走によって発生した雑音と判断した。一般に、エンジン回転数を上げて高速で航走するほど雑音は大きくなるため、雑音と船速（エンジン・プロペラ回転数）との関係を事前に求め、定線航走時の船速の決定に用いた。

方 法

測定は、Takao and Furusawa (1995) および古澤ら (1995) の方法に従い、1997年12月から2002年1月に掛けての計7回実施した。第三開洋丸では、プロペラ回転数とプロペラピッチの両方を変えることにより船速を調整する。そこで、プロペラ回転数とプロペラピッチの組み合わせにより、静止状態から10ノット超までの範囲で4～9種類の船速を設定し、それぞれの船速における雑音レベルを測定した。

結果と考察

航走雑音と船速との関係をFig. 5に示した。38kHzにおける雑音のレベルは-155～-135dBの範囲で推移した (Fig. 5 上図)。2001年1月に測定された結果は、船の停止状態を除く全ての船速において、それ以外の時期の測定結果に比べて3～8dB程度高い値を示した。この時期、雑音成分を増加させる何らかの要因が船にあったものと考えられるが、理由は特定されなかった。いずれの測定時においても、対水船速が7～9ノット付近で最も航走雑音レベルが低くなり、それ以上かそれ以下の船速の双方において雑音レベルが上昇する傾向が見られた。一方、120kHzでは、雑音レベルは-140dB付近に位置し、船速や測定時期による変化がほとんど見られなかった (Fig. 5 下図)。

パッシブモードで運用した計量魚探機のエコーグラム上に現れた航走雑音の例をFig. 6に示した。このエコーグラムからも、38kHzにおいて船速に応じて雑音レベルが大きく変動することが明らかとなった。7.8ノットから9.0ノットに船速を上げることにより、 S_v モードでは深度700m以深におけるエコーレベルが明らかに低下し (Fig. 6 左上図)、またTSモードにおいても、TSの強さを表示する色の变化からエコーレベルの減少が示された (Fig. 6 右上図)。船速を9.4ノットまで上げると、雑音レベルは再び上昇し、 S_v モードおよびTS

モード共に深度500m層以浅まで雑音が影響を与えるのが確認された (Fig. 6 上図)。一方、120kHzでは船速による雑音レベルの変化は S_v モードおよびTSモードのいずれにおいても確認できず (Fig. 6 下図)、船速に関わらずほぼ一定の雑音レベルがエコーグラム上に現れた。この結果から、120kHzにおける雑音は、航走による雑音ではなく、電気的な雑音である可能性が考えられた。また、 S_v モードでは、深度100m付近から-80dBを上回る比較的高いレベルの雑音が出現したことから (Fig. 6 左下図)、第三開洋丸とEK-500の組み合わせで120kHzによる音響計測を行う場合には、この高いレベルの雑音の存在が実際の測定深度の制限要因となることが示された。

1.2.3 航走減衰および気泡減衰

航走減衰とは、船の航走によって発生した水中の気泡が送受波器の直下を通過することにより、本来得られるべき散乱強度が気泡による減衰を受けて受波される現象である (古澤, 宮野鼻, 1983; 古澤ら, 1995)。多くの場合、船速の増加とともに航走減衰は大きくなり、実際の調査においては現存量の過小推定の要因となる。この現象は、船首や船底の形状、送受波器の取り付け位置や方法によって影響を受けるため、船毎にその特性は大きく異なる。そこで、第三開洋丸における航走減衰の特性を明らかにし、本船において音響資源調査を行う際の適切な調査設計および航走方法の提示を試みた。

方 法

本研究では、減衰の程度を測定するための対象として海底を用いた。音響パルスを送波する海底に向けて送波すると、まずビームの音軸上で海底に入射し、そこからの散乱波が最も早く、かつ強く受波される。その後音響パルスは時間の経過とともに海底上を同心円上に拡がりながら到達し、その時間遅れを伴いながら順に受波される。この過程を音軸上での音波の進行に置き換えると、海底による反応は海底面から海底下数mまでの連続的なエコーとして表現される。青山ら (1999) は、海底面の平均 S_v と積分層の厚さの積が、海底の表面後方散乱強度に一致することを理論計算および現場測定の双方において示した。よって、計量魚探機で海底面からその下層に対して適切な深度にわたる積分層を設定し、その面積後方散乱強度 (Area backscattering strength, 以後海底 S_a と表記) を測定すれば、その値を海底の表面後方散乱強度と見なすことができる。積分層の設定およびデータ解析の方法は、古澤, 宮野鼻 (1983), 濱野ら (1988) の方法に準じた。周波数38kHz

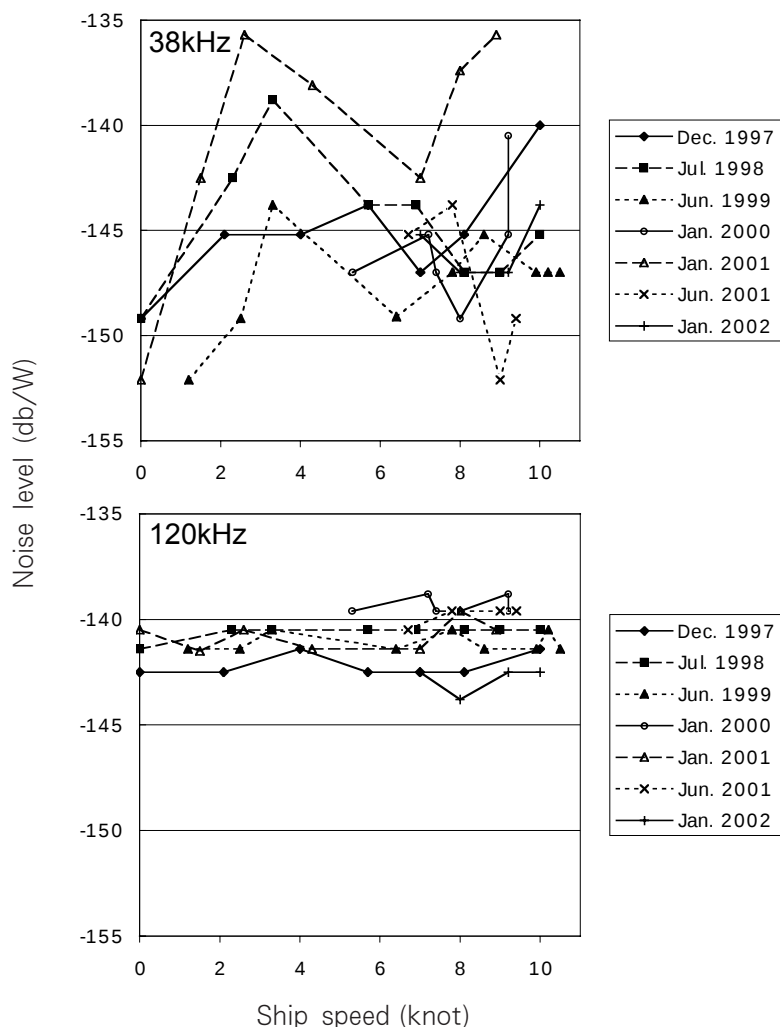


Fig. 5. Variation of the noise level of EK-500 onboard of Kaiyo-Maru No. 3, in relation to the ship speed

および120kHzで捉えた海底付近のエコーグラムをシムラッド社製データ解析処理ソフトBI-500で収録し、その後BI-500および自作の解析プログラムを用いて、 S_v 、収録位置、時刻、海底深度の諸測定値を抽出し、船速や航走方向との関係について検討した。収録、解析ともにスレッシュホールドは設定せず、積分層内の全てのデータをそのまま積分に用いた。単位積分距離 (the Elementary Sampling Distance Unit, ESDU) は、スケトウダラを対象として実施される音響資源調査と同じ0.1カイリとし、またデータの処理についても、通常の音響資源調査で用いられるBI-500を用いて、全く同じ手順で積分処理を行った。なお、さらに詳細なデータが必要な場合には、自作の解析プログラムを用いて航走0.005カイリ毎に S_v を抽出して解析に用いた。海底 S_a (あるいは海底を含む積分層における平均 S_v) を求める積分層の設定については、古澤、宮野鼻 (1983)

および濱野ら (1988) が海底面を中心とした上下計10mに設定したのに対し、本研究では海底下の積分深度幅を広げ、海底面上5mから海底下10mとした。これは、本研究における計量魚探機と底質の組み合わせにおいて、海底の表面後方散乱強度として出現する“見かけ上の海底下反応”が海底下何mまで現れるかについての情報がなかったため、十分な余裕をもって海底の表面後方散乱強度全体を捉えられるよう、既往の報告よりも幅広く積分層を設定したことによる。

調査は、1998年7月24日に道東沿岸の厚内沖約8カイリ、水深77~79mの陸棚上で実施した。等深線とほぼ平行に、北緯42度39.5分、東経143度54.9分と北緯42度38.4分、東経143度53.6分を結ぶ約1.3カイリの定線を設定し、計量魚探機を作動させながら様々な船速で往路と復路の2回反復航走した。往路と復路両方の航走を行った理由は、風やうねりを受ける方向が航走減衰

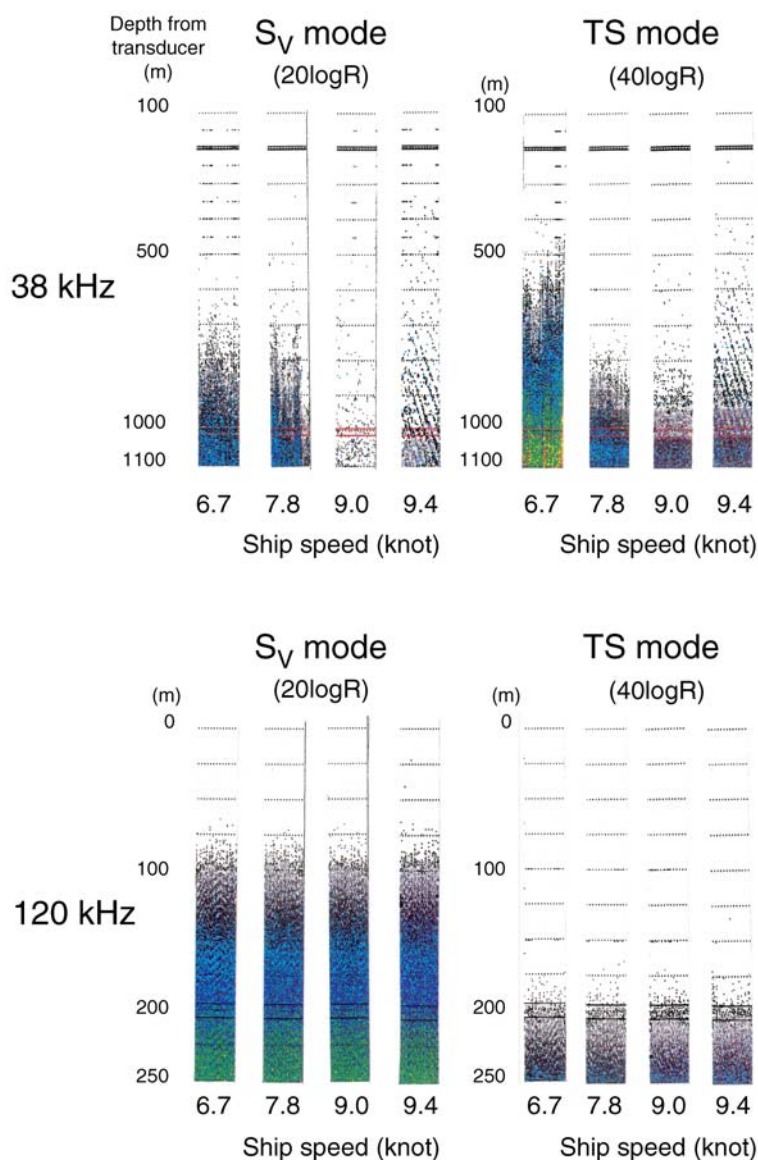


Fig. 6. Occurrence of the sailing noise of Kaiyo-Maru No. 3 on the echogram at each frequency and the integration mode in relation to the ship speed (June 2001)

に与える影響について検討するためである。測定場所の選定に際しては、事前に周辺海域を航走し、海底の起伏が無く、海底のエコーレベルもほぼ一定で、かつ魚群やプランクトンの分布が少ないことを確認した。底質の確認は行っていないが、海図（海上保安庁水路部, 1974）によると、周辺海域の海底は砂泥質（M.S）であるとされている。

船の挙動や海象等の情報は、試験航走中に計量魚探機で得られるデータとリンクできる形で同時に連続的に収録するのが望ましいが、本調査ではこれらの情報を連続的に記録する機材を用意できなかった。そこで、各船速における往路と復路それぞれの航走において、

定線への入線時と出線時の2回、真の風向（船首方向に対する角度に換算）と風速、船首方向に対するうねりの角度（船速の補正を行っていない相対値）と階級、風浪の階級、対水船速、クリノメーターで計測した各航走中の最大ローリング角（左右）の各項目を記録した（Table 2）。

航走速度は次のように設定した。他の目的で既に実施された試験航走の結果から、およそ4, 5, 6, 7, 8, 9, 10ノットの対水船速が達成されるエンジン回転数とプロペラピッチの組み合わせを事前に設定し、それらの値を維持した状態で定線上を航走した（Table 2）。必ずしも予定した船速に達しなかった場合、あるいは

航走中に船速が変化した場合でも、エンジン回転数やプロペラピッチの調整は行わず、その場合には入線時と出線時における対水船速の平均値をその航走の船速として扱った。また、往路航走を終え復路航走に入る、あるいは異なる船速での航走に移る際には、先の航走で発生した航跡の影響を避けるため、おおむね5～10分程度の間隔をおいて実施した。各航走ともできる限り直線的に航走し、全く同じ海底上を走査するよう努めたが、実際には潮流やGPSの誤差などから、定線を中心に多少の蛇行が生じた。特に舵の効きにくい低速航走時には、かなり大きく蛇行し、定線を逸脱することも多かったため、航走によって入線から出線までの航走距離に約0.1カイリのばらつきが生じた。

結 果

航走時の状況

航走試験中の気象状況は、調査開始時は風速約4 m, うねり4, 波浪3で、後に風速約2 m, うねり3, 波浪2と若干静穏になった (Table 2)。風およびうねりの方向はほぼ一致しており、往路では船の進行方向に対して左舷前方10時方向からの向かい風および向かい波、また復路では逆に右舷後方4時方向からの追い風および追い波であった。調査全体を通じて風およびうねりの方向には殆ど変化がみられなかった。Table 2に、風向およびうねりの方向を、共に自船の船首方向を0度とした相対方位で示した。この際、風速と風向については自船の移動による影響を除去した値を記載し

たのに対して、うねりについては自船の移動による影響を補正することができず、進行中の自船から観測したうねりの方向をそのまま示した。そのため、特に復路の航走における風向とうねりの方角が大きく異なる値をとることになったが、実際には風の方向とうねりの方向はほぼ同じであった。

常に風波を左舷前方から受ける形となった往路の航走では、船速が8ノットを越えるとピッチングが大きくなり、船底を通過する気泡層によって超音波が減衰を受け、エコーが極端に弱くなったり、抜けたりする現象、すなわち泡切れがエコーグラム上に確認され、さらに時折船底で海表面を叩く“パンチング”が観測された。一方、風波を右舷後方から受ける形での航走となった復路においては、船速に関わらず泡切れ、パンチングともに観測されなかった。

鉛直方向における平均海底 S_v の出現様式

本研究における積分層設定が、海底の表面後方散乱強度を十分に捉えているか否か、また海底以外の層が積分値にどの程度影響を与えているかについて検討するため、海底付近の S_v の分布を、深度1 m刻み、航走0.005カイリ毎に抽出し、海底の表面後方散乱強度の出現パターンについて検討した。

その結果、 S_v の鉛直分布は、いずれの航走、周波数においても、海底面～海底下数mの深度帯で急激に上昇し、その後深度の増加とともに徐々に低下するパターンを示した。例として、Fig. 7に船速7ノット、復路

Table 2. Conditions of the experimental runs and the sea states

Leg	Direction against swell	Speed (knot)	Wind		Swell		Wave class	Max. Rolling (deg.)	
			Direction*	Speed(m/s)	Direction**	Class		Left	Right
1	Head sea	6.9	0	0.5	300	4	3	8	10
	Following sea	7.2	0	0.3	120	4	3	6	7
2	Head sea	7.8	300	4.1	300	3	3	7	9
	Following sea	8.0	69	2.1	120	3	3	8	8
3	Head sea	8.8	294	3.8	300	3	3	7	10
	Following sea	8.8	85	2.8	120	3	2	7	6
4	Head sea	9.6	276	2.7	300	3	2	6	9
	Following sea	9.7	74	3.6	120	3	2	8	6
5	Head sea	5.3	319	2.9	300	3	2	10	10
	Following sea	5.5	63	2.6	120	3	2	8	10
6	Head sea	3.3	0	1.7	300	3	2	10	15
	Following sea	2.7	70	1.1	120	3	2	11	13
7	Head sea	4.2	298	2.0	300	3	2	8	10
	Following sea	4.2	67	1.8	120	3	2	12	15

* True wind direction which was formed with the direction of travel.

** Relative swell direction which was formed with the direction of travel.

における38kHz, 120kHz両周波数で収録された海底面上5m～海底下10mの範囲における S_V の鉛直分布の一部を示した。海底深度および積分範囲の決定にあたっては、計量魚探機が表示した海底深度の小数点以下を四捨五入した値を基準とした。Fig. 7の例では、データによって海底深度が77mあるいは78mのどちらかの値をとるため、海底面上5mから海底下10mの範囲についても、72～87mと73～88mの2種類がグラフ上に混在している。Fig. 7をみると、周波数によって、海底深度付近での S_V の立ち上がりやピークの幅などに差が見られたものの、基本的な分布パターンは同様であった。ただし、これらの S_V を海底面上5m～海底下10mの範囲で鉛直方向に合算して求めた海底 S_a は、周波数38kHzの方が周波数120kHzの場合よりも4dB程度高い値を示した。また、いずれの周波数においても、海底

面から海底下3mまでの範囲で得られた S_V が、積分層全体から計算される海底 S_a の99%以上を占めた。この結果は、海底 S_a の値が海底面から海底下3mまでの層における S_V によって決定され、水中及び見掛け上の海底下3m以深から得られる S_V は、海底 S_a の大きさに対して実質的な影響を与えていないことを意味する。よって、本研究で設定した海底面上5m～海底下10mの積分層から得られる海底 S_a は、そのまま海底の表面後方散乱強度を示す値として扱うことができる。

航走条件に伴う海底 S_a の変化

次に、周波数、航走速度、ならびに風波を受ける方向による海底 S_a の変化について検討した。ESDUを0.1カイリに設定し、1.3～1.4カイリを航走した。このデータから、周波数、船速、航走方向別に海底 S_a 分布の平

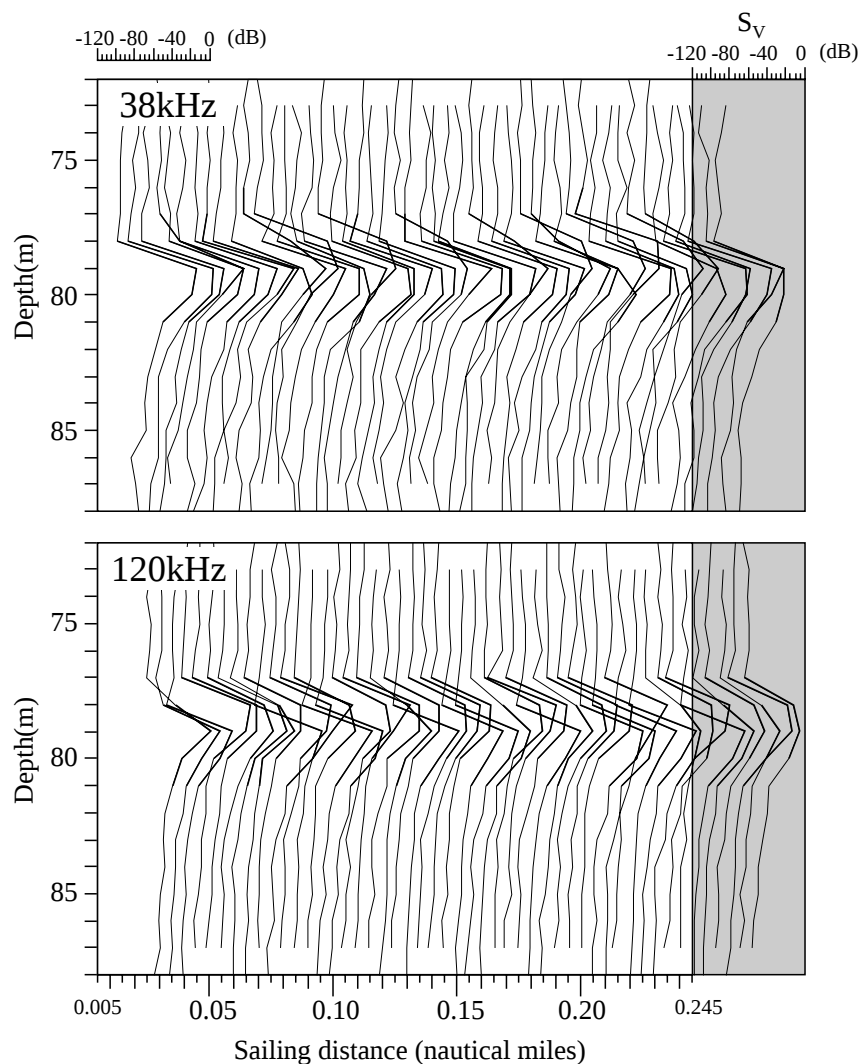


Fig. 7. Distribution pattern of mean S_V in the proximity of the sea bottom at each 1m vertical unit (upper: 38kHz, lower: 120kHz). Thick lines indicate the layer 3m beneath the bottom

均および標準誤差を計算し、船速に対してプロットした (Fig. 8)。なお平均値および標準誤差の算出の際には、対数表記されている平均海底 S_a 値を一旦線形値に換算したうえで計算を行い、再びdB単位にして表示した。

その結果、風波を左舷前方から受ける航走において、両周波数ともに船速に応じて平均海底 S_a が変化する様子が観察された。船速を徐々に上げていくと、6.9ノット付近で海底 S_a の低下傾向が現れ、船速7.8~8.8ノット付近で最低値を示した。このとき、平均海底 S_a の変動幅は38kHzで1.30dB、120kHzで0.67dBであり、38kHzのほうが大きく影響を受けることが示された。さらに船速を上げ、9.7ノットに達すると、それまで低下傾向にあった平均海底 S_a は再び上昇した。一方、復路、すなわち風波を右舷後方から受けながらの航走においては、船速9.6ノット航走時の38kHzのデータにおいて平均海底 S_a が0.7dBほど低下した。また、120kHzにおいては、船速の増加に伴い平均海底 S_a が若干上昇する (最大0.5dB) などの変化が観察されたものの、各船速における平均海底 S_a の標準誤差範囲は重複しており、往路のような平均海底 S_a の明確な変化は両周波数ともに認められなかった。

次に、風波を受ける方向および船速が平均海底 S_a の変化に与える効果を検証するため、分散分析による解析を行った。周波数を2種類、船速を7種類、航走方向を2種類とし、計28通りの組み合わせによるデータセットに対して、対数分散分析による等分散検定 (Sokal and Rohlf, 1995) を行い、各データセット間で分散に有意な差が無いことを確認の上、前述の3要素を独立変数とする三元配置分散分析を行った。なお、等分散の検定およびその後の分散分析には、dB単位の平均海底 S_a の分布を用いた。また、同じ船速カテゴリーであるにも関わらず、航走方向によって船速の差が生じたケースについては、両航走における船速の平均値をカテゴリーの代表値とした。解析の結果、主効果として周波数および航走方向の違いが、さらに交互作用として周波数と航走方向および航走方向と船速の組み合わせが、平均海底 S_a の平均値に有意に影響を与えていることが示された (Table 3)。Fig. 8からも明らかに、周波数によって平均海底 S_a の水準は大きく異なり、これが周波数間での有意差として現れたものと考えられる。また、航走方向および航走方向と船速の交互作用が有意となったことは、両周波数ともに、船速7~9ノット付近において、風波を船首側から受ける航走で収録された平均海底 S_a が、船尾側から受ける場合よりも低下したことを反映したのと考えられる。さらに、周波数と航走方向の交互作用が有意となっ

たことは、航走方向による平均海底 S_a の変化が120kHzよりも38kHzでより大きかったことを示していると考えられる。

次に、船速による平均海底 S_a の変化が現れた、風波を船首側から受ける航走について、船速を独立変数、平均海底 S_a を従属変数として周波数毎に多重比較 (Games-Howell) を行った (有意水準5%)。その結果、38kHzにおいて、4.2ノットと7.9ノットあるいは8.8ノットの間、および5.4ノットと8.8ノットの間で海底 S_a に有意差が認められた。一方、120kHzではいずれの船速の組み合わせにおいても有意差は見いだされなかった。

さらに、平均海底 S_a の変化の詳細を調べるため、0.005カイリ毎に抽出した海底 S_a の挙動について検討した (Fig. 9)。積分層の設定は、先の解析と同様に、海底上5m~海底下10mの15m層とした。各航走におけるデータ数は、それぞれ約280個前後に上った。解析の結果、定線上の特定の位置に対応した海底 S_a の変化はみられず、海底の音響散乱特性は場所によらずほぼ均質であったことが示された (Fig. 9)。一方、風波を船首側から受ける航走において、38kHz、120kHzともに、船速の増加につれて時折海底 S_a の急激な低下が観測されていたことが明らかになった (Fig. 9 左列)。この海底 S_a の低下部分とエコーグラムとの照合を行ったところ、特に海底 S_a が大きく低下した付近では、泡切れによるエコーグラムの欠落や、海底エコーレベルの低下が記録されていた。そこで、この海底 S_a の急激な低下が、ESDUを0.1カイリとして計算された平均海底 S_a の変動に影響を与えているか否かについて検討した。海底 S_a 値が-25dB以下になった場合を“急激な低下”と見なし、これらのデータを含めた場合と除いた場合のそれぞれについて、ESDUを0.1カイリに設定して平均海底 S_a を計算した (Fig. 10)。その結果、風波を船首側から受ける航走から計算された平均海底 S_a は、-25dB以下の値を除くことにより、38kHzで最大0.4dB、120kHzでは最大0.2dB程度上昇したが、船速の増加に応じて平均海底 S_a が低下する傾向を覆すには至らなかった。このことから、風波を船首から受ける航走において船速の増加に伴い平均海底 S_a が低下した現象は、特定のごく低い海底エコーの発生のみでは説明しきれず、むしろ海底 S_a データそのものが全体的に低下したためと考えられる。

考 察

平均海底 S_a の減衰を引き起こした要因の特定

航走中に標的から得られる S_v 値が低下する原因としては、大きく3つの要因が考えられる。一つは水中に

含まれる気泡による音波の減衰であり、通常状態における自船の航走時に発生した気泡によって生じる音波減衰のことを“航走減衰”と呼ぶのは前述の通りである。これとは別に、船体の動揺が影響を与える場合も考えられる。一般に計量魚探機は、通常の魚探機に比べてビーム幅を狭くしているものが多い。この場合、船体のピッチングやローリングによって音波の送波時と受波時で送受波器の方向が大きく異なると、標的に当たってはね返ってきた音を受波ビームの中に捉えることができなくなり、過小評価となるおそれが生じる (Stanton, 1982)。さらに海底を対象とした測定を行う場合は、後述する海底の持つ特殊な散乱特性の影響も考慮する必要がある。本研究の目的は、航走減衰の効

果の有無および程度を測定することであるが、測定結果には上述の複数の要因による影響が組み合わされた状態で現れている可能性がある。そこで、今回の測定条件下において各要因が与える影響について考察を加えた。

まず、船体動揺によって送波と受波の角度にずれが生じることによる過小推定の可能性について検討する。本研究の測定条件において、送波した音波が水深78mの海底に反射して受波されるまでに掛かる時間は、水中音速を1,500m/秒と仮定すると約0.1秒である。一方、第三開洋丸の船体動揺周期については、本実験では測定を行わなかったが、船の完成時に実施した動揺試験の結果から、通常の航走時における船体動揺の周期は

Table 3. ANOVA table for analyzing the effects of the three different factors: frequency, direction and speed against the attenuation by sailing

Source of variation	<i>df</i>	Sum-of-squares	Mean square	<i>F</i> values	<i>p</i> values
Main effect					
Frequency (Freq.)	1	1285.550	1285.550	1334.570	<0.0001*
Sailing direction (Dir.)	1	38.261	38.261	39.720	<0.0001*
Ship speed (Speed)	6	7.728	1.288	1.337	0.2399
Interaction					
Freq. • Dir.	1	4.450	4.450	4.619	0.0323*
Freq. • Speed	6	9.774	1.629	1.691	0.1223
Dir. • Speed	6	17.269	2.878	2.988	0.0074*
Freq. • Dir. • Speed	6	4.537	0.756	0.785	0.5822
Residual	340	327.512	0.963		

* Significant ($p=0.05$)

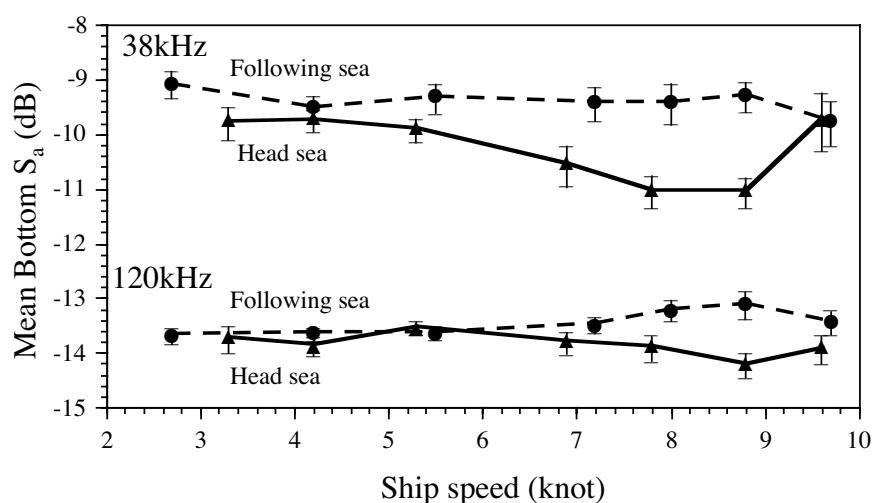


Fig. 8. Variation of the mean bottom S_a and its standard error with increasing ship speed under combinations of the three factors: frequency, speed and direction

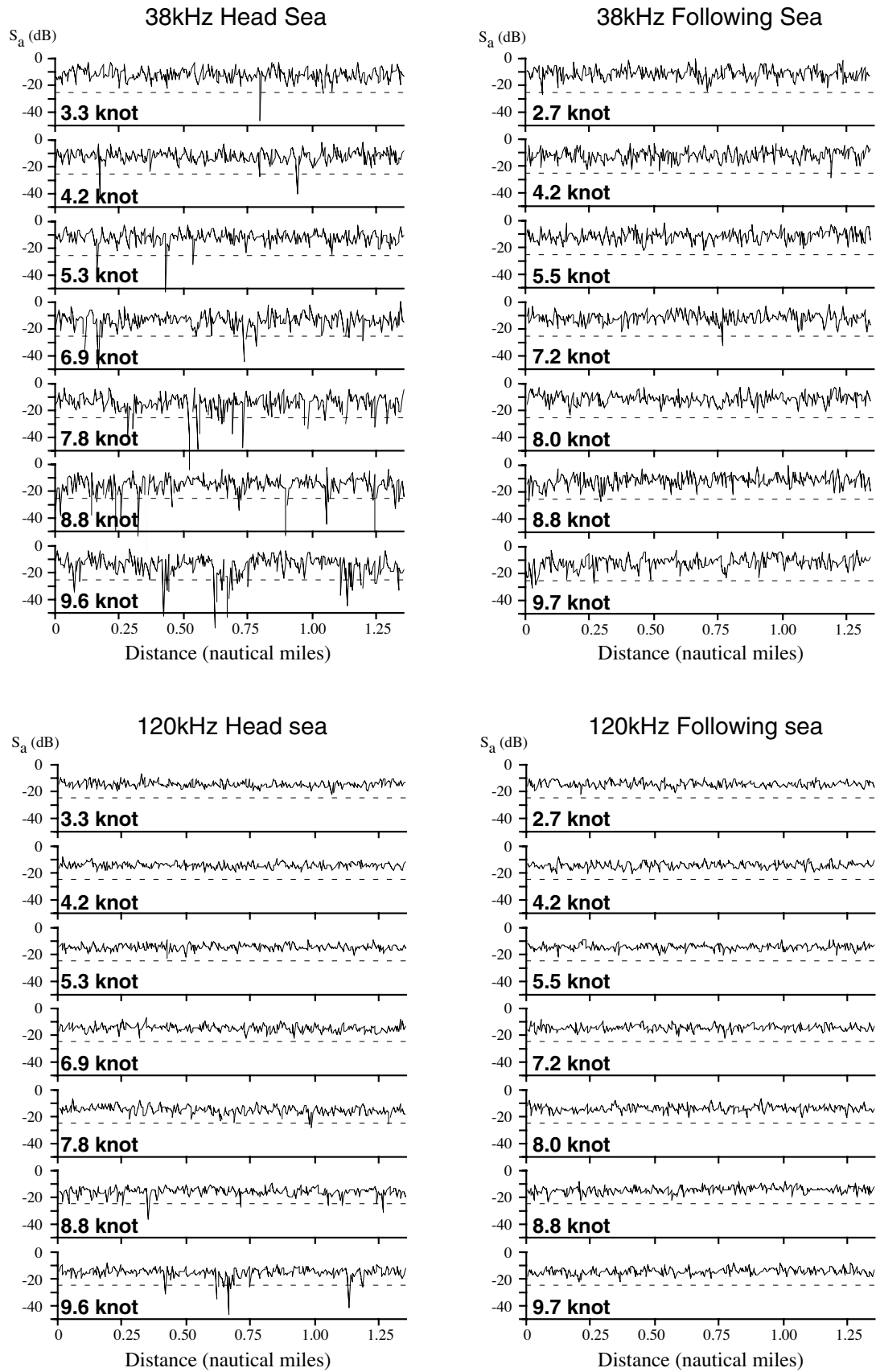


Fig. 9. Variability of the mean bottom S_a taken for every 0.005 nautical mile run for each combination of ship speed and direction. Broken lines indicate the -25dB level

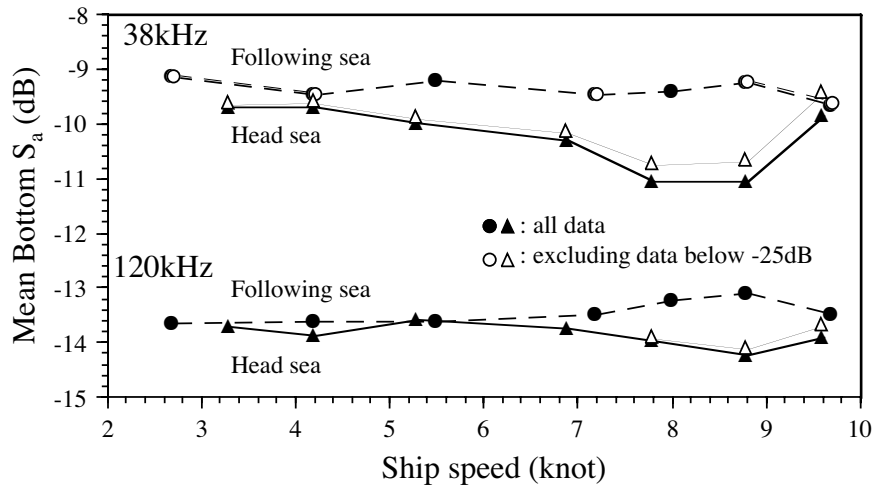


Fig. 10. Average of the bottom S_a taken for every 0.005 nautical mile run including or excluding "slumped" data which were below -25 dB

7.4秒～9.8秒であると予測された。当時とは若干の艤装、タンク状況などの違いはあるものの、船体動揺の周期が当時に比べて大きく変化しているとは考えにくく、また実験時に調査員が受けた体感からも、船の動揺周期は、送波から受波に掛かる時間: 0.1秒に比べ十分に長かった。このことから、本研究の測定条件において、送波から受波までの間の受波器の角度の変化はごくわずかであり、送波/受波の角度のずれに由来する海底の表面後方散乱強度の低下は、本研究の条件の様な浅海域では無視しても差し支えないと考えられた。

次に考えられるのが、海底への音波の入射角（グレージング角）による海底の表面後方散乱強度の変化の可能性である。魚などの標的に音波を送波すると、標的に当たった入射波はあらゆる方向に散乱し、そのうちの音源方向に跳ね返っていく散乱波が後方散乱波として受波器で捉えられ、音響計測が成立する。しかし、海底や板状の金属の物体等では後方散乱波の指向特性が極端に偏る現象が見られる。すなわち、海底に入射した音波は、魚群の場合のように全方向に対して散乱するのではなく、入射角と等しい反射角を海底面に対する垂線を中心とした鏡像方向に持つ“平面反射波”として反射される。この場合、音源と正対する方向を0度として入射角、反射角を定義したときに、入射角が0度に近い場合は、反射波として非常に大きな後方散乱波が得られるが、入射角が大きくなるに従って反射角も大きくなるため、後方散乱波は急激に小さくなる（ユーリック、1985）。黄ら（1997）はランベルトの法則を用いて、周波数25kHzにおいて船体動揺による海底の表面後方散乱強度の変化を理論計算し、船体動揺が10度に達すると、海底の表面後方散乱強度のピークが最大時の4割まで低下することを示した。また、

Urick（1954）およびUrick（1956）は、本研究で使用した周波数に比較的近い周波数帯（55kHz、60kHz）を用いて、海底へのグレージング角と海底の散乱強度の関係を調べ、底質が砂あるいはシルトの条件下において、鉛直に近いグレージング角では多少角度が変化しても海底の表面後方散乱強度はそれほど変化せず、角度が鉛直方向から10度程度ずれると海底の表面後方散乱強度が10dB近く低下することを示した。このように、海底を標的に用いた測定においては、グレージング角の変化が、海底の表面後方散乱強度に変化をもたらす可能性を考慮してデータの解析を進める必要がある。しかし、本実験では連続的な船体動揺の測定を行っていないため、船体動揺角と海底の表面後方散乱強度の変化を連続的に対応付けて考察することは不可能である。

そこで、船体動揺に関して唯一測定されている最大ローリング角のデータから、船速、航走方向とローリング角の関係を推察し、さらに海底 S_a の変化との対応について考察を試みた。各航走において得られた最大ローリング角を比較すると（Table 2, Fig. 11）、航走方向に関わらず、多くの航走において左舷側へのローリング角が右舷側へのローリング角度を上回っていた。これは、船のバランスあるいはトリムなど、実験時の船の特性が反映された結果と考えられる。また、船速が5ノットを上回ると、低速時よりも最大ローリング角は小さくなる傾向が見られた。この傾向は、風波を船首側から受ける航走よりも、船尾側から受ける航走において顕著に現れた。もし仮に、最大ローリング角が航走中の平均的なローリングの大きさおよび頻度を反映した指標として有効であり、かつローリングに伴うグレージング角の変化が海底の表面後方散乱強度に影響

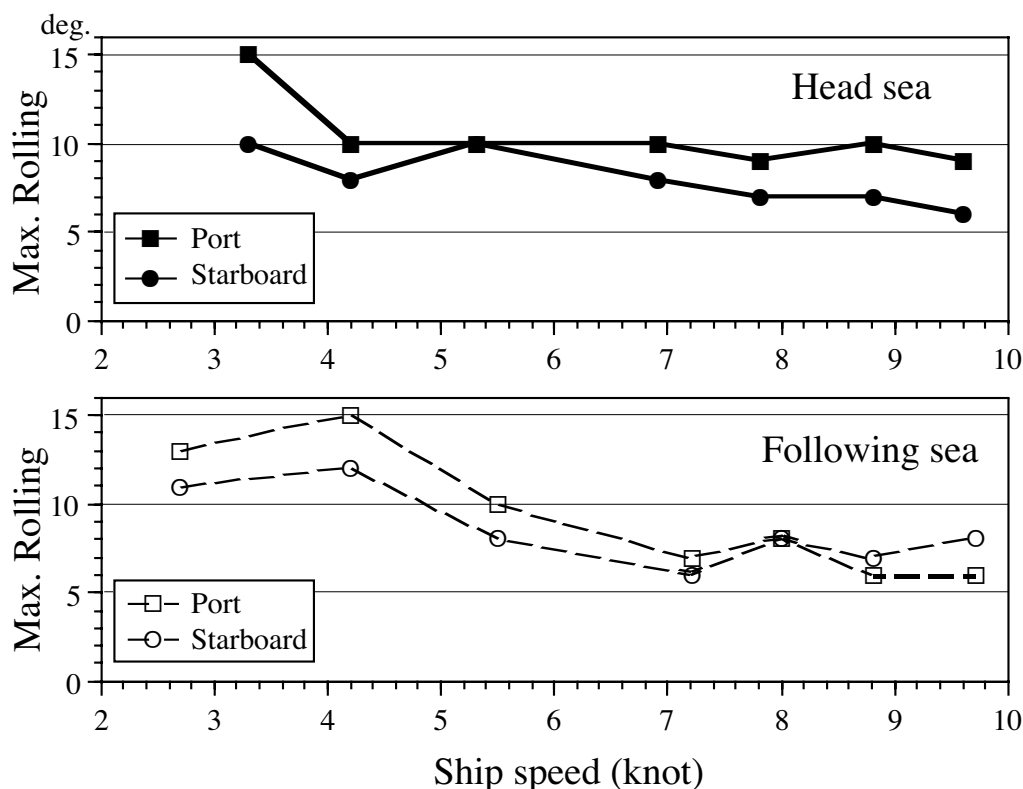


Fig. 11. Maximum rolling angles with the combination of two factors: direction and ship speed. Upper: head sea; lower: following sea conditions

響を与えているとするならば、ローリングが大きくなる低速航走時ほどグレージング角の変化は増大し、それに起因する海底の表面後方散乱強度の減衰も頻繁に観察されるはずである。しかし実際の航走では、平均海底 S_a の低下および航走0.005カイリ間隔で抽出した海底 S_a 値の急激な落ち込みは、風波を船首方向から受け、かつ高速で航走する航走において頻繁に出現しており、最大ローリング角が大きくなる低速航走時には海底 S_a の変動はむしろ小さくなった。

以上の考察は、あくまで最大ローリング角がその航走中のローリングの程度の指標となることを前提としている。その仮定に立つならば、ローリングによって発生したと予想されるグレージング角の変化と実際の海底 S_a の変動傾向は一致せず、グレージング角の変化による海底 S_a の低下が発生していたとしても、ローリング成分による効果は小さかったのではないかと推測される。

一方、本研究では測定することができなかったが、グレージング角の変化をもたらす船体動揺の成分には、ローリングの他にピッチングも挙げられる。ピッチングが海底 S_a に影響を与える要因としては、グレージング角の変化による海底の表面後方散乱強度の低下と、

船首部の上下動によって発生した気泡が船底を通過する際に起こる音波減衰の2種類が考えられる。前者が海底を対象とした場合のみ考慮すべき特殊な要因であるのに対して、後者は航走減衰の要因そのものであり、航走減衰の影響を測定するためには、後者の影響のみを抽出する必要がある。しかしながら、本研究のように海底を対象とした測定法では、両効果は重畳して現れるため、その分離は容易ではない。この問題については、既往の研究成果が重要な示唆を与えている。柴田ら(1970)は、総トン数197.1トンの以西底曳き漁船における船体動揺と海底の表面後方散乱強度の関係を連続的に測定し、動揺角が10度以内の測定条件において、船体動揺と海底の表面後方散乱強度との間に直接的な相関が見られなかったことを示した。同時に、海底の表面後方散乱強度の変動が、ピッチングに対して時間遅れの相関を持ち、これが船首部で発生した気泡の船底通過に伴う減衰である可能性を示唆した。また濱野ら(1988)は、総トン数603トンのトロール型調査船において同様の測定試験を実施し、海底の積分値との相関が最も大きな要因として風向を挙げ、風浪を進行方向に対していずれの角度から受けるかによってピッチングの大きさが変化すること、ローリングよりもピッ

チングが海底の表面後方散乱強度により大きく影響を与えること、さらにそれらの理由として、船体のピッチング動作に伴い海表面に発生する気泡が海底の表面後方散乱強度を減衰させる可能性を指摘した。航走減衰はその船によって大きく異なる特性であり、既往の知見、結果がそのまま他の船に当てはまるとは限らない。しかしながら、上述の研究結果は、いずれもピッチングおよびその結果として発生する気泡層による音波減衰の影響を指摘している。また、海底の表面後方散乱強度の減衰が風波を受ける方向、および船速の増加に伴い増大するピッチングの大きさと関連づけられる点においても、本研究の結果と一致する。

今後船体動揺の測定を含めて航走減衰の測定を行う機会が得られた場合には、グレージング角の変化による影響を検出し、海底 S_a の変動から除去する方法について十分に検討する必要がある。

航走減衰の程度

本研究で測定された航走減衰は、風波を船首方向から受ける航走においてのみ観測され、その効果は船速 7.8~8.8 ノット付近で最大となり、低速航走時に対して 38kHz では 1.30dB、120kHz では 0.67dB の減衰を示した。さらに、船速が 9.6 ノットに達すると、海底 S_a は低速航走時とほぼ同じ水準まで上昇した (Fig. 8)。このように、ある速度帯において航走減衰が極大となり、その速度帯を超えると再び減衰が小さくなるパターンは他にも報告がある。古澤、宮野鼻 (1983) が 5 隻の北転船 (349 トン型) および漁業調査船 (157 トン) を対象として実施した航走減衰の測定では、ある船において、船速 8~9 ノット付近で海底 S_v が 3~4 dB 程度低下した後、10 ノット付近で再び海底 S_v が上昇し、低速航走時に近いレベルまで回復する様子が観察された。ただし、同時に測定された他の船では、航走減衰が観察されない、あるいは船速の増加に対して航走減衰が単調的に増加するなど、航走減衰の出現パターンは船によってまちまちであった。このことから、航走減衰と船速との関係は、船のサイズやバランス、船底形状や送受波器の取り付け位置など、その船の総合的な特性によって大きく異なるものと考えられた。

一方、航走減衰の規模については、古澤、宮野鼻 (1983) の研究では船によって最大 1~5 dB とバラつきが大きいものの、比較的大きな減衰を示す船が多かったのに対して、本研究で示された航走減衰の最大値は 1.3dB (38kHz) であり、相対的に小さな値に留まった。このことから、本研究に用いた第三開洋丸では、ある航走条件において航走減衰が発生することは確かであるものの、その影響は過去の測定例と比較して小さな

部類に入るものと判断された。

風波の方向と航走減衰の関係

本研究では、風波を船首側から受けて航走する場合に、38kHz、120kHz とともに船速の増加に伴う航走減衰の効果が観察された。このとき、風波の方向と自船の進行方向との関係は非常に大きな要因であり、風波を船尾側から受ける航走では、船速、周波数に関わらず減衰の効果は殆ど見られなかった。濱野ら (1988) の報告によると、風向と船首方向が正対する状態での航走では、88kHz において高速航走時に減衰が観察されたが、200kHz では減衰が観察されなかった。逆に、風を船尾方向から受ける航走では、88kHz では減衰が観測されなかったのに対して、200kHz では減衰が観察された。この理由として、88kHz では航走時のピッチングによって生じた気泡が、また 200kHz ではローリングによる音波ビームの揺れが減衰の主要因であると考察している。両研究とも、船首側から風波を受ける航走において、特に低い側の周波数で船速に応じた航走減衰の影響が観察された。また、船速の上昇に伴いピッチングが大きくなるという点についても、本研究では正確なピッチング角の測定をしていないものの、風波を船首から受けながら高速で航走した際に、船底で海面を叩くパンチングが観察されるようになったことから、ほぼ同様の状況にあったものと推察される。

本研究に用いた第三開洋丸においては、120kHz における航走減衰の影響は、38kHz におけるそれよりも小さく、この点についても、濱野ら (1988) の報告と一致した。しかし、古澤、宮野鼻 (1983) は、周波数による航走減衰の多寡が船によってまちまちであることを複数の船における測定結果から指摘しており、また、Dalen and Løvic (1981) は、気泡による減衰は高い周波数ほど影響が大きいと述べているなど、周波数と航走減衰の関係は個々の条件によって大きく異なると考えられる。

本研究では、風波を船首側から受ける航走において、平均海底 S_a は船速 7 ノット付近から徐々に低下し始めた。一方、航走中に明確な泡切れやパンチングが確認されたのは、船速が 8 ノットを超えてからであった。このことは、計量魚探機のディスプレイや記録紙上で泡切れ現象を確認し、あるいはパンチングを体感する状況に至る以前から、海底の表面後方散乱強度が低下し始めていたことを意味する。前述のように、本研究ではピッチングに伴うグレージング角の変化の影響について評価できていないため、この海底 S_a の低下がピッチングによるグレージング角の変化によるものか、あるいは航走に伴って発生した気泡による減衰なのかを

判別し、分離することはできない。前者の場合には、実際の魚群を対象とした測定ではそれほど問題とはならないが、後者の気泡減衰の影響であったとすると、これは実際の調査時において大きな問題となりうる。すなわち、音響資源調査においては、泡切れが観察されるような気象条件下では船速を落とすなどして、気泡減衰の影響を受けないように努めながら調査を実施することが多い。しかし、泡切れが生じる以前の段階から航走減衰の影響が既に現れているとすると、泡切れを検知してから船速を落としたのでは既に遅いということの意味する。本研究の結果からは、この効果の有無を明確にすることができなかったが、実際の調査時においては、収録データの精度を確保するために、泡切れが生じなくなる船速よりもさらに船速を落としてデータを収録するなどの安全策をとるべきである。

一方で、風波を船尾側から受ける航走では、船速に関わらず、ほぼ一定した平均海底 S_a を得ることができた。これは、この方向での航走ならば、両周波数ともに船速による航走減衰が発生しにくいことを示しており、実際に調査を実施する上で非常に有効な特徴であるといえる。実際の音響資源調査では、この特性を活かし、できる限り風波を船尾側から受ける形で航走することにより、航走減衰による現存量推定値の過小推定を防ぐことができる。

1.3 調査時期および海域に起因する誤差要因

調査時期や調査海域の設定は、音響資源調査に限らず、全ての現存量直接推定調査において非常に重要な問題である。本研究において主たる対象とする魚群は、漁獲対象資源に加入する以前のスケトウダラ幼魚、若齢魚群であることは既に決まっているが、それらの現存量を、いつ、どこで捉えれば、その系群全体における年級豊度の代表値としての現存量を測定したことになるのかは、その対象種における季節移動・回遊、日周鉛直移動パターンなど、生態的な特徴の把握が必須である。これについては第2章で扱う。

対象種の生態以外にも、調査の時期や海域を規定あるいは制限する要素はいくつか存在する。その一つは、調査の障害となりうる条件が少ない時期であることである。音響資源調査では、調査対象海域に縦横に調査船を走らせ、対象種の分布情報を音響により連続的に収録する。その際、1.2節で示したように、本調査で使用した調査船においては、風波を船首側から受ける航走において航走減衰が発生することから、調査はできる限り静穏な海象条件下で実施されるのが望ましい。また、調査海域内の定線航走および漁具を用いた魚種

確認作業が問題なく実施できることも音響資源調査においては重要な条件となる。また精度の良い調査を実施するためには、対象とするスケトウダラ幼魚、若齢魚以外の魚が魚探映像に混在しない、あるいはし難い時期を選択するのが望ましい。

さらに、本調査の目的が、加入前の幼魚、未成魚の年級豊度を推定し、それを資源評価に活用することである以上、調査の結果は、その年の資源評価に間に合うように整理されなければならない。よって、調査の時期、特にその終了の時期については、資源評価のスケジュールから逆算した結果に制限を受けることになる。本項では、これらの異なる要因からみた、音響資源調査に好適な時期について検討する。

1.3.1 気象・海象

調査船の航行に最も大きな影響を与える要因は、気象・海象条件である。荒天が予想されるような時期には、調査航海の実施自体が困難であるし、強い風波の条件下での音響資源調査は、気泡減衰による現存量の過小推定を招く原因となることから、そのような気象条件下での調査は望ましくない。本調査における主たる調査海域は、道東海域および日高湾の大陸棚および上部大陸斜面海域であることから、同海域における気象、海象条件の季節変化について検討するため、波浪に最も大きく影響を与える風速のデータについて検討した。

アメダスデータから、釧路、広尾、浦河、苫小牧および室蘭の北海道太平洋岸の5点を選び、1971年から1990年までの20年間のデータを用いて、月別平均風速と、最大風速が10m/sを越える平均日数を抽出した。その結果、平均風速は各地点とも6～7月に最も静穏となる一方、10月から翌3月頃に強くなる傾向が示された (Fig. 12 上図)。特に秋～冬季の浦河および室蘭における月平均風速は5 m/sを越え、また最大風速が10m/sを越える日も10日以上と (Fig. 12 下図)、船の航行にとっては非常に厳しい気象条件となることが示された。一方、それ以外の3地点においては、9月以降の秋季に一旦平均風速が上昇するものの、厳冬期には風速は弱まり、3～5月にかけて再び強まる傾向が示された (Fig. 12)。

以上の結果を総合すると、風速を指標として太平洋沿岸における海象条件の季節変化を考えた場合、最も風が弱く、音響資源調査が実施しやすいと予想される時期は6～8月頃であると考えられた。冬期間は各地点ともに風速が強まり、特に日高湾沿岸の浦河および室蘭の付近では、相当に強い風が吹き、時化模様になることが予想される。その一方で、道東海域の釧路、

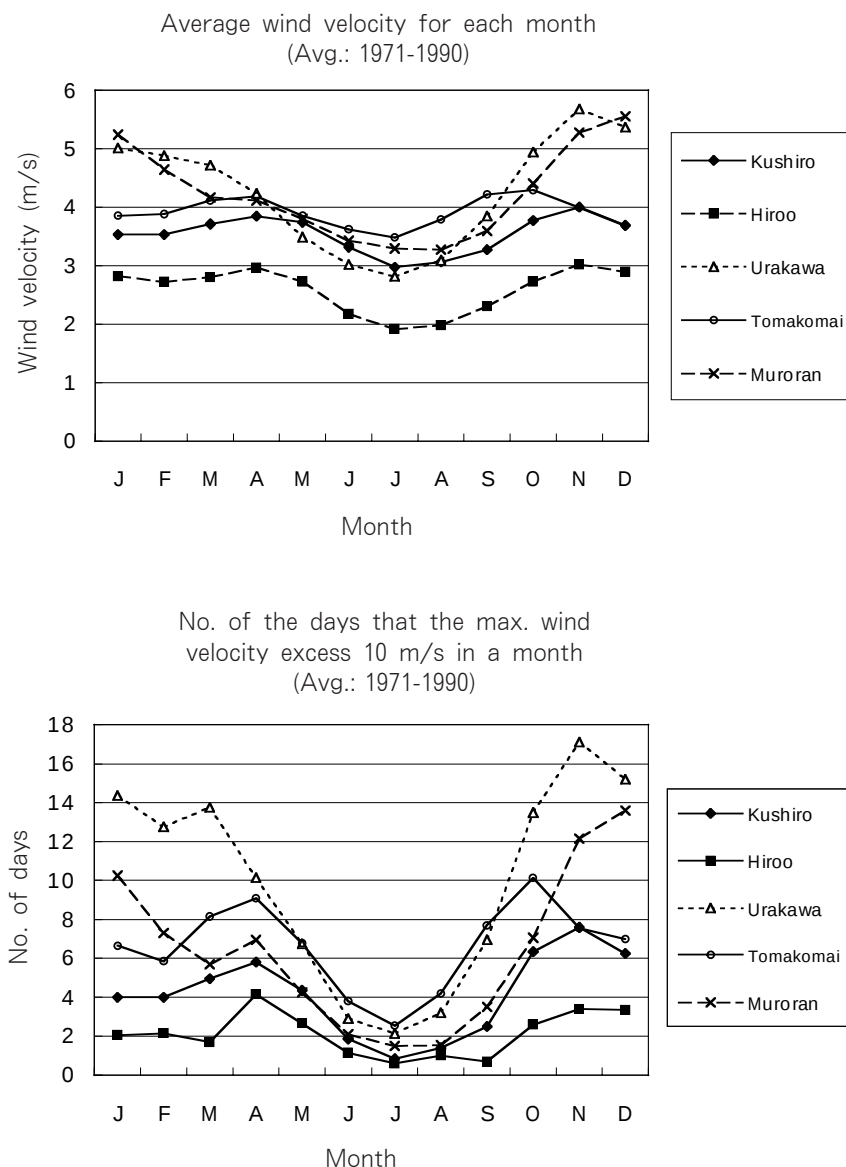


Fig. 12. Wind conditions at the 5 stations located on a shore of the Pacific side of Hokkaido. Both the average wind velocity (upper) and the number of the days that the maximum wind velocity exceeded 10 m/s in a month (lower) are quoted from AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) database

広尾および日高湾沿岸の苫小牧では、風が強くなるのは10～11月頃の秋季と3～4月の春季であり、厳冬期にはむしろ風は弱まる傾向にあった。

1.3.2 定線航走および漁獲試験が容易な時期の選定

音響資源調査では、定線航走による音響データの収集と、トロールその他の漁具を用いた魚種確認がその主な内容となる。よって、対象海域を問題なく航行し、かつ魚探反応が見られた場所で即座に魚種確認のための試験操業を実施できることが、精度の良い音響資源調査を実施する上での前提となる。しかし、北海道太

平洋側海域は、水産資源に恵まれた海域であり、スケトウダラを含む様々な魚種を対象とした様々な漁業が営まれている。そのため、ときに調査船調査と漁業が重なる場合がある。特に、音響資源調査の障害となる漁業種類は、流し網やカゴ、延縄、底刺し網などの敷設漁具である。流し網の敷設海域と音響資源調査の海域が重複すると、何層にも平行に設網された流し網を横切って航走する際の漁具被害の発生や、プロペラに漁網を巻き付ける危険などから、実質的に定線航走の実施は不可能となり、調査に重大な支障を招くことになる。よって、できる限りこれらの流し網の操業時期

および海域と重複しないように音響資源調査の時期と海域を設定する必要がある。

北海道太平洋岸における流し網漁業は、春季のサケマス漁業と、初夏のサンマ流し網漁業がある。サケマス流し網は、道東太平洋海域を主漁場とし、4月に操業が始まり、7月上旬まで続く。この間、操業海域は徐々に東側に移行し、7月上旬の終漁時には漁場は根室沖側海域に集中する。また、終漁期が近くなるに従い操業隻数も減少し、6月末時点での操業隻数は、春の操業開始時に比べると少なくなる。一方、サンマ刺し網漁業は、道東沖合を主漁場として7月上旬から9月末まで操業が行われる。

よって、これらの流し網漁業と重ならないように調査を行うには、道東海域の調査を、サケマス流し網の操業が減少する6月下旬から7月上旬に設定し、特にサケマス流し網の設網域と被る可能性の高い納沙布岬沖海域については、できる限りサケマスの終漁期の近くまで待ち、かつサンマ流し網の解禁前の時期に実施するように設定するのが望ましい。

一方、魚種確認のためのトロール漁獲試験は、沿岸漁業と競合する危険性が高い。道東海域においては、沖底船のための漁場域が設定されているが、そのほとんどは陸棚斜面域以遠の沖合域である。スケトウダラ幼魚、未成魚が分布する道東の陸棚上では（第2章で後述）、トロールの曳網が行われないことを前提として、ほぼ周年にわたり底刺し網やタコ空縄、ツブカゴ等の沿岸漁業が盛んに行われている。夏季よりも冬季に底刺し網の設置数は増加し、特に日高湾海域ではスケトウダラ親魚を対象とした底刺し網が大量に敷設されるため、トロール網の曳網を非常に困難にする。

計量魚探機で発見した魚群の魚種・サイズ確認のためには、それをトロール網によって採集し、実際に確認する作業が必須であるが、そのために漁具被害が発生したり、沿岸漁業者とトラブルを起こしては、調査の実施自体が危ぶまれることにもなる。よって、調査の実施にあたり、事前に各沿岸漁業協同組合と連絡をとり、漁具の敷設状況についての情報を収集し、曳網可能な海域があるかどうかについて事前に調べておくことが望ましい。その結果、どうしても曳網が困難な状況においては、魚種確認を中止せざるを得ない。

1.3.3 ABC算定のための時間的制約

現行のTAC制における資源評価のスケジュールでは、8月中には各魚種、系群毎のABCを確定する必要がある。ABCは、まず地域ブロックで検討が行われ、その結果を全国資源評価会議において再度検討し、承認を得た時点で確定となる。よって、地域ブロックでの

ABC算定は遅くとも7月中旬までには終了しなければならない。一方、音響資源調査から得られる若齢魚の年級別現存量推定値は、そのまま評価に用いられるのではなく、VPAのチューニングのためのデータとして用いられることになるため、VPAチューニング作業に掛かる時間を見しておく必要がある。さらに、音響資源調査によって得られた音響データを、年齢別の現存量に変換する作業にさらに数日～1週間程度掛かることを考慮すると、7月のごく早い時期には調査を全て終了し、その後すぐにデータ解析、年齢別現存量推定作業に入る体制を整えておく必要がある。

1.4 考 察

本章では、音響資源調査を実施するうえで事前に検討・検証しておくべき諸条件のうち、音響調査に直接あるいは間接的に影響を与える調査機器および調査船の性能あるいは特性と、調査の実施時期に影響を与える外的な諸条件の2点について検討を行った。

計量魚探機および調査船の特性としては、アンプゲインの測定および校正、航走雑音の測定および航走減衰の3項目について検討を加えた。アンプゲインの測定値の変動幅は最大で2 dB程度で、また120kHzのシステムにおいて2001年1月以降アンプゲインが低下傾向にある点が示された。しかし、極端なアンプゲインの変化は見られず、各校正時に適切に校正が行われている限りにおいては、特に問題はないと考えられた。

38kHzの測定系において得られた航走雑音測定結果および航走減衰特性は、本船を用いて音響資源調査を行う場合の航走方法についての示唆を与えるものであった。すなわち、風波を船尾側から受ける航走が可能な場合には航走雑音レベルが低くなる7～9ノットで航走し、また風波を船首方向から受けながら航走しなければならない状況では、船速をあらかじめ5～6ノットまで落とすなど、風向と海況に応じて船速を大きく変更することによって、航走雑音と航走減衰の影響が共に小さい状態での調査の実施が可能となる。また、調査の時期および調査海域における風向等があらかじめ分かっている場合には、風波を船尾側から受けて航走できるような定線配置を行い、また調査の現場においても、その時の海況・風向などに応じて航走方向を変更することができれば、航走減衰の影響をできる限り除いた状態で、音響資源調査を行うことが可能と判断された。特に航走減衰については、泡切れなどのように、気泡による減衰を体感するレベルより前の船速から徐々に発生しつつある可能性が示唆された。したがって、実際の調査時には、できる限り風波を

船尾側から受ける形での航走を行い、また風波が強い気象条件下では船速を十分に下げるなど、気泡による減衰の影響を減じような方策が必須である。

一方、120kHzの測定系では、雑音レベルは-140dB付近を示し、船速や測定時期による変化がほとんど見られなかったが、エコーグラム上で雑音を確認され、S_vモードではいずれの船速であっても水深100m以深に雑音の影響が現れていることが明らかとなった。これは、航走雑音というよりも電気的な雑音の影響である可能性が高く、船速を調整しても状況を改善することは困難であった。本研究では、38kHzの測定系を主に用いた測定を行うため、120kHzの測定系における諸条件はさほど重大な制限要因にはならないが、もし同じ航走で得られた120kHzのデータを用いた解析を行う場合には、その有効探知深度に関して38kHzに比べて厳しい制約が付くことを考慮すべきであろう。

天候やその他の外的条件による調査実施上の季節的条件、あるいは制約については、気象的な条件、他の漁業との関係、資源評価上の時間的制約の3つの異なる条件面からそれぞれ検討した。このうち最も重要な条件は、調査の結果がABC算定に活かされるということであるが、同時に調査の遂行が容易、あるいは可能な時期であることも重要な条件である。気象的な条件、他の漁業との関係、資源評価上の時間的制約と3つの異なる条件面から検討した結果、見いだされた調査時期は、海が凪ぎ、流し網漁業とも重ならず、かつABC算定に間に合う6～7月の初夏の時期が、最も好適か

つ妥当な調査時期と考えられた (Fig. 13)。

第2章 北海道太平洋沿岸におけるスケトウダラの分布特性と年齢別現存量推定

調査対象魚種の生態的特徴は、音響資源調査の設計や実施に大きく影響を与える。例を挙げると、音響資源調査では、魚群が表層あるいは海底付近のデッドゾーンに分布しない季節、時間帯を選んで調査を行うことが、現存量推定の精度を向上させるうえで効果的である (Aglen, 1994)。スケトウダラの場合には、魚群の日周鉛直移動などの行動特性を事前に調べる必要がある。また、調査で求めた年齢別現存量の推定値が、資源全体での年級豊度の代表値となるためには、その資源における年齢別の分布や移動・回遊パターンを把握したうえで、適切な調査範囲や時期を設定する必要がある。しかしながら、本研究を開始した1996年当時は、北海道太平洋側海域における着底期以降のスケトウダラ若齢魚の分布生態に関する知見は、噴火湾湾口部海域 (佐々木, 長澤, 1993)、および道東海域の陸棚沖合および上部斜面域 (渡辺ら, 1993) を除いてほとんど明らかにされていない状態にあった。そこで本研究では、音響資源調査によってスケトウダラ若齢魚群の年齢別分布生態の把握、およびその現存量推定を同時に行い、双方の結果を互いにフィードバックさせながら調査設計の改善を行った。

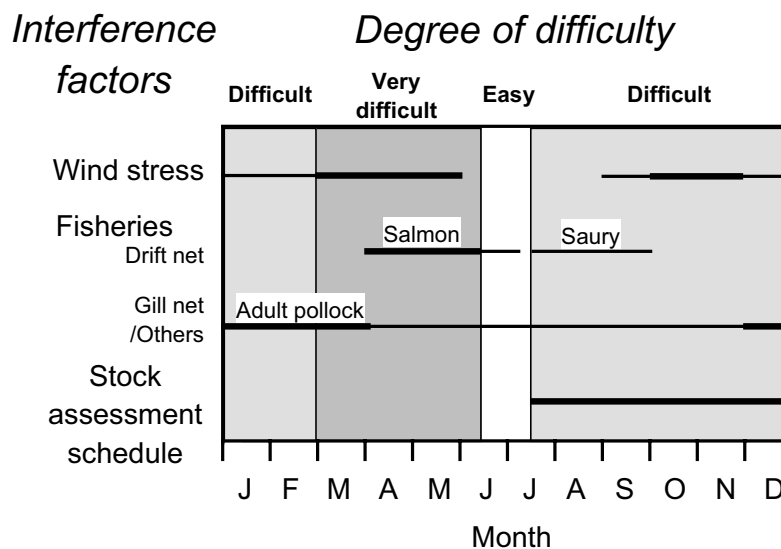


Fig. 13. Degree of difficulty to conduct the acoustic survey of walleye pollock in the Doto area in relation to several interference factors. Both the thickness of the horizontal lines of interference factors and the density of the shading indicate the degree of obstacle to carry out the acoustic survey in each season/month

Table 4. Survey period and method, acoustic equipment, area covered and the number of trawl tows carried out during each survey

Period	Research vessel	Survey method	Acoustic equipment	Survey area	No. of transect	No. of Trawl tows	Notes
24 Jun.-5 Jul. 1996	Wakataka maru	Echo sounder with midwater trawl	Kaijo KFC-2000 (38 kHz)	Doto	18	12	
27 Aug.-6 Sep. 1996	Yoko maru	Echo sounder with midwater trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	Doto	18	12	For comparison of fish distribution at age in Doto with June 1996
5-26 Dec. 1997	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	Doto	18	17	Only the data recorded in nighttime was used for the analysis.
6-20 Jan. 1998	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	Doto	18	17	Only the data recorded in nighttime was used for the analysis.
11-23 Jul. 1998	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	Doto	19	24	Half a month later than the usual survey conducted in early summer.
7-29 Jan. 1999	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater/bottom trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	Doto	19	16 (+9*)	
16 Jun.-1 Jul. 1999	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater/bottom trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	Doto	19	30	Transects off Nosappu in nighttime were omitted due to commercial driftnet operations.
5-31 Jan. 2000	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater/bottom trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	E. Hidaka Bay Doto	11 19	- 26	
16 Jun.-5 Jul. 2000	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater/bottom trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	E. Hidaka Bay Doto	11 19	8 25	
6-31 Jan. 2001	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater/bottom trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	W. Hidaka Bay E. Hidaka Bay Doto	7 11 19	- - 17	
13 Jun.-1 Jul. 2001	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater/bottom trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	W. Hidaka Bay E. Hidaka Bay Doto	7 11 19	12 8 30	
21-30 Jul. 2001	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater/bottom trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	Doto	19	33	For comparison of fish distribution at age in Doto with June 2001
6 Jun.-4 Feb. 2002	Kaiyo-maru No.3	Echo sounder with midwater/bottom trawl	Simrad EK-500 (38 kHz)	W. Hidaka Bay E. Hidaka Bay Doto	7 11 19	- 2 25	

*Small bottom beam trawl for age-0 pollock in shallow area.

材料と方法

調査は、1996年6月から2002年1月までの間、毎年1月および6月の2回ずつ実施した (Table 4)。ただし、1997年については1月、6月共に欠測となった。また1998年の初夏の調査については、調査船のスケジュールの関係で、例年の6月ではなく7月に実施した。さらに、1カ月程度の短期間における魚群分布パターンおよび現存量推定値の変化を捉える目的で、通常の1月および6月の調査の他に、1996年8月、1997年12月および2001年7月にも同様の調査を行い、結果の比較

を行った。調査に使用した船舶および計量魚探機は、1996年6月の調査では東北区水産研究所所属の若鷹丸と (株)カイジョー製KFC-2000、1996年8月の調査では西海区水産研究所所属の陽光丸とシムラッド社製EK-500、そして1997年12月以降の調査では日本海洋株式会社所属の第三開洋丸およびシムラッド社製EK-500を用いた。3船ともスターントロール型の漁業調査船で、いずれの船に搭載されていた計量魚探機においても、38kHzと120kHz、さらにKFC-2000では200kHzも含めて複数の周波数による測定が可能であった。調査

時には全ての周波数についてデータの収録を行ったが、本研究では基本的に38kHzによって収録されたデータのみを量的な評価に用いた。

調査海域は、1996から1999年までの間に実施した調査では、襟裳岬から納沙布岬に至る水深50m以深から水深500mまでの陸棚および陸棚斜面域に設定した (Fig. 14)。その後、2000年以降の調査では、道東海域に加えて日高湾東部の大陸棚および上部斜面域を調査対象海域に含め、さらに2001年以降は噴火湾内を含む北海道太平洋側海域全域へと調査海域を拡大した。道東海域の陸棚および陸棚斜面域を調査開始当初の調査海域として設定した理由は、道東海域がスケトウダラ未成魚の主要な漁場であり (小林, 1985)、特に若齢魚が多く分布することが予想されたこと、さらに1980年代前半に道東陸棚域に分布する0歳魚の資源量指数とスケトウダラ太平洋系群全体としての年級豊度との間に有意な相関が見られ (Miyake *et al.*, 1996)、道東陸棚域に分布するスケトウダラ若齢魚の分布量がスケトウダラ太平洋系群全体における若齢魚の年級豊度を代表することが期待されたことなどによる。また道東海域の陸棚縁辺部および斜面域では以前から沖底の操業が行われており、トロール曳網を伴う資源調査の導入が比較的容易と予測されたことも道東海域を選択する理由の一つであった。その後、トロール曳網を含む調査手法が確立され、また計量魚探機とトロール曳網を併用する資源調査への漁業者の理解が得られるようになった時点で、商業オッタートロール操業が行われていない日高湾海域へと調査海域を徐々に拡大した (Table 4, Fig. 14)。

音響資源調査における航走定線の設定は、どのような解析方法を採用するかによって大きく異なる。本調査

の設計にあたっては、近年音響資源調査の解析に多用されている空間統計学の手法の一つである1-D Transitive 法 (Petitgas, 1993) の適用を前提として定線を配置した。すなわち、スケトウダラの分布域を含むと想定される水深50~500mまでの陸棚および陸棚斜面域に、等深線と垂直となる方向で8マイル間隔で平行に調査定線を配置し、これらの定線上を、昼間と夜間の2回、計量魚探機を作動させながらそれぞれ一定の速度で調査船を航走させ、データを収録した。調査開始当初は同海域におけるスケトウダラ若齢魚の日周鉛直移動については不明な点が多かったが、魚種によっては魚群の鉛直移動が起こり、TSに時間変化が生じることが知られており (MacLennan and Simmonds, 1992)、北海道太平洋海域に分布するスケトウダラにおいても、日出没と連動する生態的な変化が予想された。そこで、調査時間帯に応じた現存量推定値の変動の有無をみるため、便宜的に日出1時間後から日没1時間前までを昼間、日没1時間後から日出1時間前までを夜間とし、その時間内に昼夜それぞれについて同一定線上を航走し、音響データを収録した。なお、日出没を挟んで前後1時間ずつの時間帯は定線航走を実施しないようにした。

定線航走時の船速については、第1章で解析した雑音測定および航走減衰測定の結果を受け、最も好適な測定条件が得られる8~10ノット付近とした。ただし、荒天時にはエコーグラムに泡切れが生じない船速まで速度を落として航走した。また、風波を船首側から受ける条件において航走減衰がより多く発生することから、できる限り風波を船尾側から受けながら航走するように、現場の気象条件に合わせて定線の航走方向を適宜変更した。

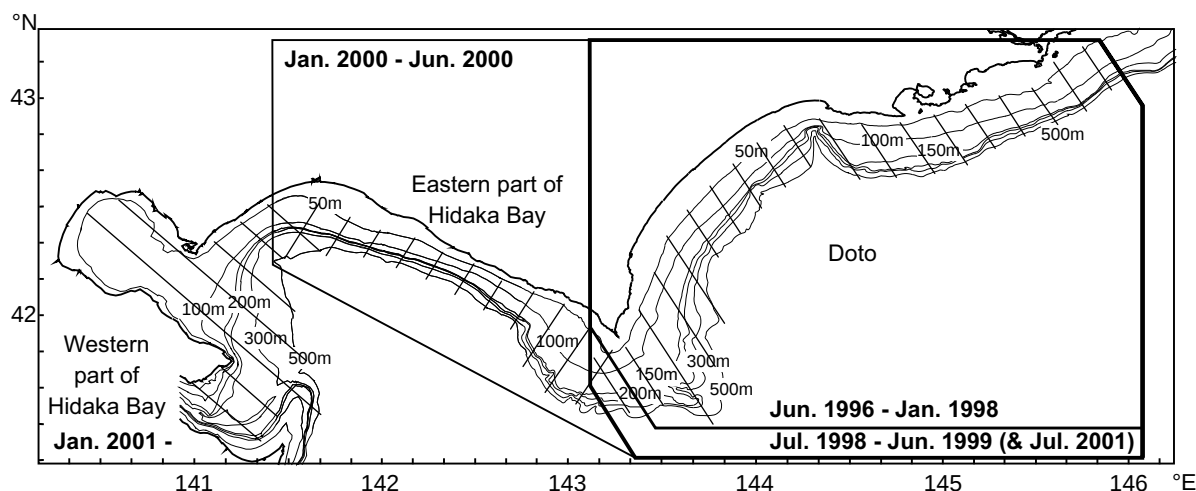


Fig. 14. Survey area at each survey period

また、昼間の定線航走時には、CTD、X-CTD (expendable conductivity-temperature-depth meter; 使い捨て電気伝導度水温深度計) やXBT (expendable bathythermograph; 使い捨て水深水温計) による海洋観測を実施した。さらに、昼間の定線航走において魚群反応が現れた場合には、その魚種・サイズ組成を判断するためにその場で一旦定線航走を中断し、トロールによる漁獲試験を行った。1998年以前に実施した調査では、トロール曳網による漁具被害の発生を危惧し、中層トロールのみによる漁獲試験を実施した。しかし、海底直上もしくは着底して分布する魚群反応も多く出現することから、1999年以降の調査では着底曳網と中層曳網の両方が可能なトロール網を使用し、対象魚群の分布深度や遊泳層に応じた曳網を行った (Table 4)。なお、夜間は周囲の漁具敷設状況の確認が困難なため、漁獲試験は実施しなかった。同様に冬季の日高湾および噴火湾海域についても、スケトウダラ成魚を対象とした底刺し網が多数設置されているため、襟裳岬周辺の一部を除いて、漁獲試験は実施しなかった。

漁獲試験によって得たスケトウダラ標本群は、二重抽出法 (田中, 1985) に則って年齢組成を推定した。船上で標本群毎に300尾を上限として体長穿孔により尾叉長組成を測定し、さらに標本群毎に100尾を上限に体重・性別などを含む精密測定を行った。1997年以降の調査では、精密測定の際に標本から耳石を摘出し、黒色樹脂包埋法 (八吹, 1994) により包埋、切断を行い、実体顕微鏡下で年齢査定を行った。複数の人間による読み合わせを行い、査定結果が合わない個体については最大3回読み合わせを繰り返し、年齢を確定した。得られた年齢-尾叉長相関表 (Age-Length Key) に基づき、体長穿孔により測定した300尾分の尾叉長組成を各年齢群に分解し、標本群毎にスケトウダラ魚群における年齢組成および年齢別体長組成を作成した。なお、1996年6月および8月に実施した調査では、耳石による年齢査定を行わなかったため、標本群の尾叉長組成から年齢組成を推定した。年齢別の平均尾叉長 $\overline{FL}$ とその母標準偏差 σ_{FL} をSawada *et al.* (1993) の平均 σ_{bs} と尾叉長の関係式に代入することによって、年齢別の平均 σ_{bs} ($\overline{\sigma_{bs}}$ と表記) を求めた:

$$\overline{\sigma_{bs}} = TS_{cm} \cdot \left(\overline{FL}^2 + \sigma_{FL}^2 \right) \quad (2.1)$$

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 $TS_{cm} = -66.0 \text{ dB}$ (Foote and Traynor, 1988) を用いた。また $\overline{\sigma_{bs}}$ を常用対数変換し、dBで表す場合には、 TS_{AVG} と表記した。

音響資源調査によって得られた魚群分布情報からのスケトウダラと思われる魚群反応の抽出および s_a 算出には、1996年6月のデータについてはシーズ・ラボ製二次積分ソフトEI2ndを、また1996年8月以降のデータについてはシムラッド社製二次積分ソフトBI-500を用いた。この際、二重に航走した重複部、泡切れなどで解析に足る品質に至らなかったデータなどの除去も行った。その後、個々の魚群反応と標本群の対応づけを行い、魚群反応毎に算出した s_a を、対応させた標本群におけるスケトウダラの年齢組成および年齢別 $\overline{\sigma_{bs}}$ を用いて各年齢群に分解した。 s_a の各年齢別分布密度への変換方法は、下式の通りである:

$$D_i = \frac{s_{ai}}{\sigma_{bsi}} = s_a \cdot \frac{p_i \cdot \sigma_{bsi}}{\sum_{i=0}^{\text{Max}} (p_i \cdot \sigma_{bsi})} \cdot \frac{1}{\sigma_{bsi}} \quad (2.2)$$

ここで、 i : 年齢

D_i : 年齢 i の年級の1 m^2 あたり分布尾数

s_{ai} : 年齢 i に分配された s_a

p_i : 年齢 i の個体の割合

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

以上の操作により、積分区間毎のスケトウダラ各年齢群別の単位面積 (本研究では1 m^2 に設定) あたりの分布尾数を得た。この方法で得られた年齢別分布密度は、その分布位置における魚群内の年齢組成および年齢別平均尾叉長の違いを全て反映した値となる。なお、漁獲試験を行わなかった魚群反応については、魚群の分布する水深帯や魚群間の距離を考慮しながら周辺海域における魚群分布パターンを類推し、隣接する定線において実施された漁獲試験の結果を当てはめた。

その後、定線毎、年齢群毎に分布尾数を足し合わせ、定線毎の年齢別分布尾数を算出した:

$$N'_{ik} = \sum_{j=1}^{\text{Max}} D_{ijk} \cdot \text{ESDU} = \sum_{j=1}^{\text{Max}} D_{ijk} \cdot 185.2 \quad (2.3)$$

ここで、 i : 年齢

j : 定線長中のESDUの順番

k : 定線の番号 (定線が複数ある場合)

N'_{ik} : 定線 k の直下に相当する長方形

(幅1 m 、長さ $j_{\text{Max}} \cdot 185.2 \text{m}$) に分布する年齢 i の分布尾数

D_{ijk} : 定線 k の j 番目の単位積分距離 (ESDU) における、年齢 i の年級の1 m^2 あたり分布尾数

この時点で、定線毎の年齢別分布尾数が算出される。

このようにして得られた各定線直下における年齢別の現存量推定値に、本調査において設定した定線間隔8カイリ=14,816 m を乗じ、調査海域全体での年齢別現

存量を算出した：

$$N_i = S \cdot \sum_{k=1}^{\text{Max}} N'_{ik} = 1852 \cdot 8 \cdot \sum_{k=1}^{\text{Max}} N'_{ik} \quad (2.4)$$

ここで、 N_i ：調査エリア内に分布する年齢 i の分布尾数

S ：定線間の距離

なお、推定値の標準誤差 (SEM) の算出には 1-D Transitive 法を用いたが、その詳細については第 4 章で論じた。

結 果

定線航走および漁獲試験の実施状況

調査対象とした海域の範囲および各海域における漁獲試験の回数を Table 4 に示した。6～8 月に実施した調査では、1999 年 6 月の調査において調査海域東端の納沙布岬沖に設定した調査定線がサケマス流し網漁業と競合し、夜間の定線航走の一部が欠測となったことを除いては、大きな問題もなく調査を遂行することができた。一方 12～1 月に実施した調査では、初夏の調査時に比べ風波が大きく、泡切れを回避するために頻繁に船速を減速したり、海上が静穏になるまで調査を中断する必要に迫られた。また、1997 年 12 月の調査では漁獲試験の実施に際して漁業者とのトラブルが発生するなど、初夏の調査に比べ調査条件としては過酷かつ困難であった。漁獲試験の実施頻度については、調査の初年度に当たる 1996 年 6 月および 8 月に実施した調査では、調査期間も短く、かつ道東海域における漁具の敷設状況に関する知見も少なく、さらに同海域においてトロール曳網によるスケトウダラ若齢魚の漁獲の経験がなかったこともあり、それぞれ 12 回ずつの漁獲試験しか実施できなかった (Table 4)。その後、漁具の敷設情報の蓄積や、同海域におけるトロール曳網の習熟などに伴い、1997 年 12 月以降は、調査を実施する毎に漁獲試験の回数は徐々に増加した。それでも、冬期の調査では敷設漁具が増加するため、漁獲試験は初夏の調査に比べて少ない回数に留まった (Table 4)。なお、1998 年以前の調査においては、トロール曳網が困難な海域に分布する魚群反応に対して曳航式刺し網 (塩出ら、1997) およびサビキ釣りによる生物採集も試みたが、いずれも統計的に十分な数の標本を集めることができなかったため、今回の解析には用いなかった。

1996 年度に実施した音響資源調査において得られた魚群反応の年齢組成

1997 年 12 月以降に実施した調査においては、耳石年輪を用いた年齢査定の結果に基づき、計量魚探機で得

た魚群反応を各年齢へ分配した。しかし、1996 年 6 月および 8 月に実施した調査では、耳石を用いた年齢査定を行わなかった。そこで、これらの 2 調査分のデータについては、耳石による年齢査定の代わりに、船上での体長穿孔によって得た標本群別の尾叉長組成を直接用いて年齢組成および年齢別平均尾叉長を推定し、計量魚探機で捉えた s_a の各年齢群への分解および尾数変換を行った。Fig. 15 に、1996 年 6 月の調査で得られたスケトウダラと考えられる魚群反応の s_a と漁獲試験の実施位置を、また Fig. 16 上図に各漁獲試験で得られたスケトウダラの尾叉長組成を示した。Fig. 16 上図に示した尾叉長組成から、同調査において漁獲したスケトウダラは、尾叉長 15～22cm、23～34cm および 35cm 以上と、3 つのサイズクラスに分かれた。一方、1980～1996 年に道東海域において沖底で漁獲されたスケトウダラ標本から算出した、Bertalanffy の成長式および体長 (BL) と尾叉 (FL) の関係式 (八吹、未発表)：

$$\begin{aligned} BL &= 565(1 - e^{-0.22927(t + 0.54416)}) \\ FL &= 1.077BL + 0.32 \end{aligned} \quad (2.5)$$

を用いて、6 月時点における各年齢群の平均尾叉長を計算すると、それぞれ 1 歳：206mm、2 歳：288mm、3 歳：354mm と推定された。これらの値は、Fig. 16 上図において見られた 3 つのサイズクラスにおける尾叉長の範囲にそれぞれ対応することから、Fig. 16 上図でみられた 3 つのサイズクラスは、小さい側から順にそれぞれ 1 歳、2 歳および 3 歳以上の年齢群に相当すると考えられた。続いて、漁獲試験を実施した位置が陸棚域か陸棚斜面域かによって尾叉長組成に違いが見られるかどうかについて検討した。その結果、陸棚斜面域で曳網されたトロール標本群 (Fig. 15) のうち、MT-6 および MT-11 では尾叉長 25cm 以上の 2 歳魚以上と考えられる個体が多数見られたのに対して (Fig. 16 上図)、陸棚上での曳網では、MT-5 の標本において 1 歳魚と 2 歳魚と考えられる個体がほぼ 1:1 の割合で混在した以外は、全ての曳網において尾叉長 25cm 以下の 1 歳魚と考えられる個体のみが漁獲された (Fig. 16 下図)。1996 年 6 月に実施した調査では、漁獲試験の回数が少なく、かつスケトウダラ 1 歳魚主体と考えられる魚群反応が道東陸棚域一帯に連続的に分布していたことから (Fig. 15)、同調査結果の解析においては、計量魚探機で捉えられた個々の魚群反応に対して漁獲試験の結果を一对一で対応させた上で s_a を各年齢に分解する方法の適用は困難と判断した。そこで、陸棚域で漁獲されたスケトウダラの多くが 16～18cm 台にモードを持つ 1 歳魚主体であり (Fig. 16 下図)、かつ調査で得られた魚群反応が昼夜ともに陸棚域を中心に分布

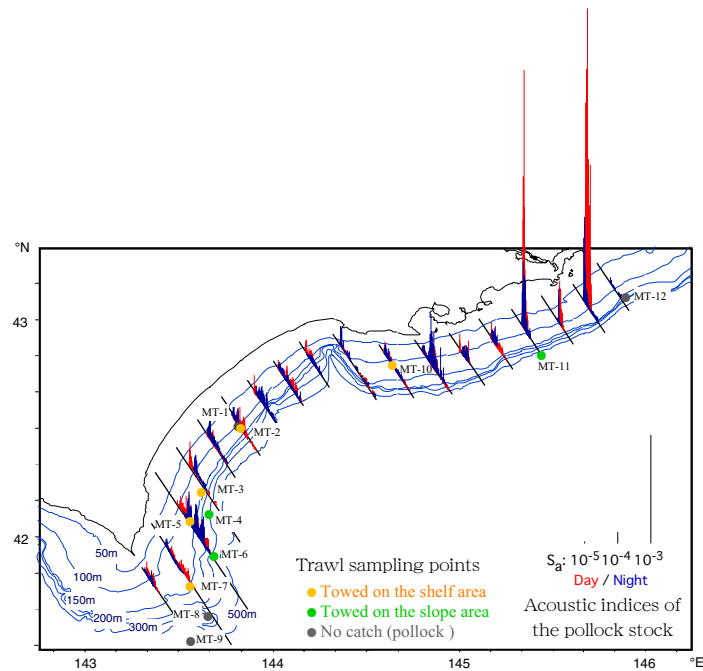


Fig. 15. Transects, trawl sampling points and the acoustic abundance indices (expressed by S_a) of walleye pollock in the Doto area in June 1996

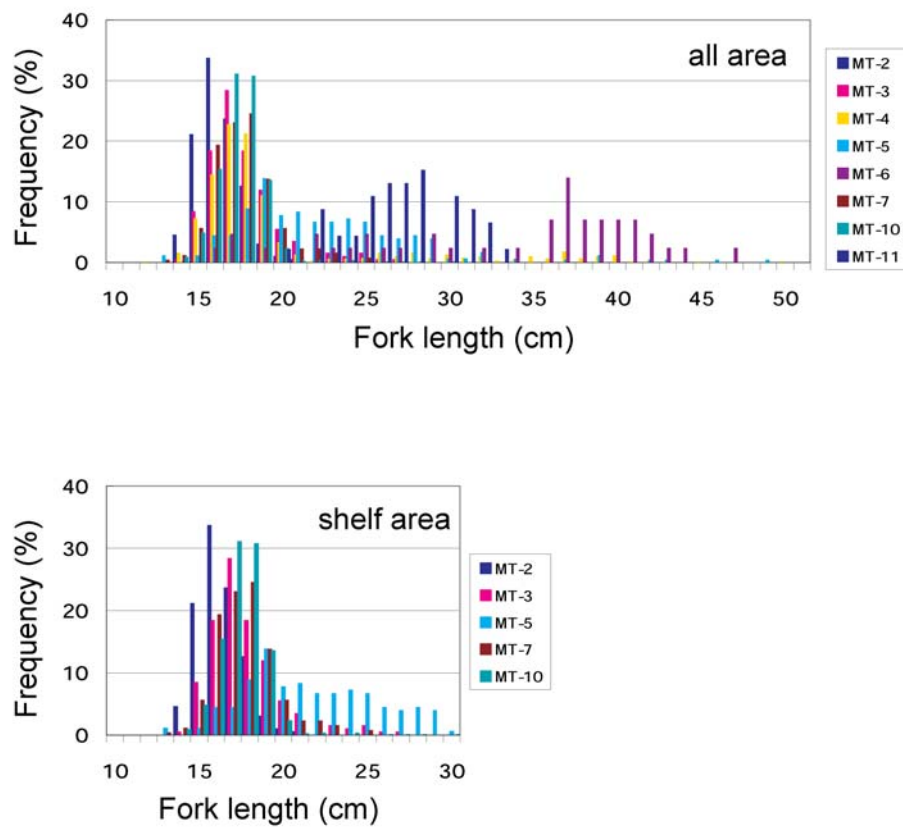


Fig. 16. Length frequencies of walleye pollock that were caught by trawl tows in the Doto area in June 1996. Upper: all area; lower: continental shelf area

し、2歳魚以上の個体が漁獲された陸棚斜面域における魚群反応が相対的に少なかったことから、同調査において計量魚探機で捉えられたスケトウダラ魚群反応の大半が1歳魚主体の年齢組成であったものと仮定した。そして、陸棚域で得られた標本群において1歳魚に相当する尾叉長範囲に含まれる個体の平均尾叉長: 17.5cmを(2.1)式に代入して $TS_{AVG} = -41.1\text{dB}$ を求め、さらにその値を(2.2)~(2.4)式に代入し、1歳魚の現存量に換算した。

1996年8月に実施した調査についても同様の方法により尾数換算を行った。計12回実施した漁獲試験のう

ち、50尾以上のスケトウダラが漁獲された曳網は5回(うちMT-6およびMT-7の2回は同一地点による曳網)のみで、その位置も釧路以西海域のみに限られた(Fig. 17)。各標本群におけるスケトウダラの尾叉長組成をみると(Fig. 18)、MT-5においては尾叉長25cm以上の2歳魚と考えられる個体のみが、それ以外のMT-7, 8, および11では、尾叉長25cm以下の1歳魚と考えられる個体のみが漁獲されていた。ただし、MT-7, 8における尾叉長組成のモードが18~19cmであったのに対し、MT-11で漁獲された1歳魚は若干大きく、21cmモードであった。一方、計量魚探機で捉えた魚群

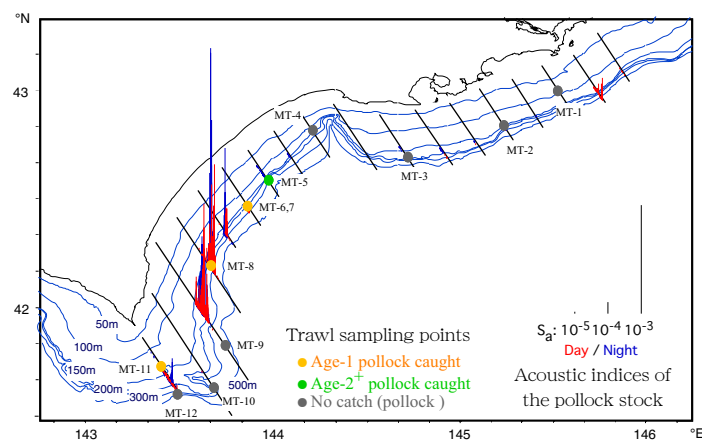


Fig. 17. Transects, trawl sampling points and the acoustic abundance indices (expressed by s_a) of walleye pollock in the Doto area in August 1996

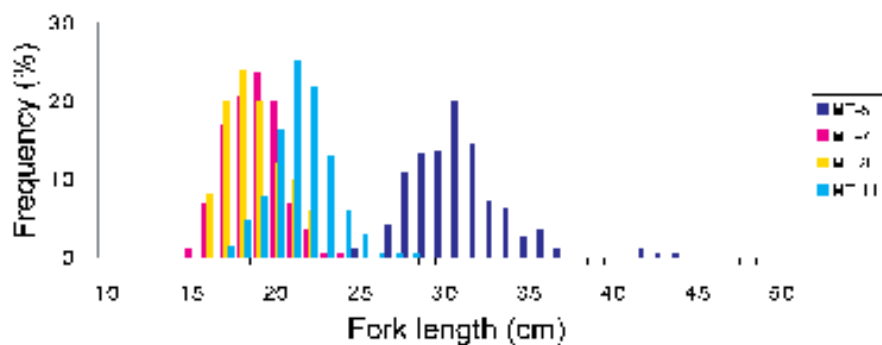


Fig. 18. Length frequencies of walleye pollock that were caught by trawl tows in the Doto area in August 1996

反応は、同年6月の調査時に比べ激減し、襟裳岬東岸の水深150～200mの付近にてまとまった魚群が見られるのみであった (Fig. 17)。また、2歳魚以上と考えられる個体が多く漁獲されたMT-5付近では、魚群反応はほとんど観察されなかった。以上の結果から、1996年8月の調査結果における魚群反応の解釈については、唯一まとまった魚群反応が得られた地点において漁獲されたMT-8における尾叉長組成のみを調査海域全体での魚群反応の年齢組成および平均尾叉長の判断に用いた。この平均FL=19.1cmを(2.1)式に代入して $TS_{AVG} = -40.4dB$ を求め、(2.2)～(2.4)式を用いて同年6月の調査と同様に全て1歳魚として現存量に換算した。

北海道太平洋岸海域におけるスケトウダラ若齢魚群の分布特性

上述したように、1996年に実施した調査では大量の1歳魚(1995年級)が道東陸棚域に分布し、加えて漁獲試験の実施回数および海域が共に限定されていたことから、陸棚域に分布する魚群反応の全てをスケトウダラ1歳魚と解釈して扱った。そのため、同年については2歳魚以上の年齢群の分布についての情報を得ることができなかった。しかし、1997年12月以降の調査においては、加齢に伴い1995年級が徐々に減少する一方で、漁獲試験の頻度が増加することにより、2歳魚以上の年齢群を含む年齢別の分布を捉えることができるようになった。なお、1997年12月および1998年1月に実施した調査については、昼間の航走で得られたエコーグラムに映る魚群反応の数および量が、夜間の航走時に比べて明らかに少なく、相当な過小推定になることが予想された。したがって、夜間の航走時に得られた魚探反応のみを解析に用いた。

調査によって多少の違いが見られたものの、北海道太平洋海域に分布するスケトウダラの魚群反応は、初夏の日高湾沿岸に分布する0歳魚を除き、主に道東および襟裳岬周辺の水深80～300mの陸棚域および陸棚斜面域で観察された (Fig. 19～31)。なお、Fig. 19～31における年齢別分布パターンの表記にあたり、年級によってその豊度に大きな差がみられたことから、表示のスケールを一部変更した。また、調査を実施した時期によって昼夜による魚群分布量の多寡に違いが生じ、6～7月中旬に実施した調査については、昼間に収録したデータに基づく現存量推定値が、夜間に収録されたデータに基づく現存量推定値よりも高かった。逆に7月下旬～8月および12～1月に実施した調査については、夜間に収録したデータに基づく現存量推定値の方が、昼間に収録したデータに基づく現存量推定値よ

りも高い値を示す傾向がみられた。そこで、Fig. 19～31では、より多くの魚群量を捉えることができた時間帯のデータ、すなわち6月の調査(1998年のみ7月)については昼間のデータを、また7～8月および12～1月の調査については夜間のデータに基づく年齢別分布パターンを示した。

本研究で主たる調査対象となるスケトウダラ若齢魚(初夏の調査では1, 2歳魚、冬季調査の場合は0歳も含む)は、いずれの季節においても、日高湾東部の襟裳岬西岸から道東の納沙布岬沖の陸棚域、80～200m深の範囲に多く出現した (Fig. 19～31)。多くの場合、若齢魚は釧路より西側の道東海域、特に襟裳岬周辺の陸棚域において多く出現した (Fig. 20～24, Fig. 27～31)。ただし、1996年6月 (Fig. 19) および1999年6月 (Fig. 25) の調査では、釧路より東側の海域において1歳魚の分布が多く確認され、また2000年1月 (Fig. 26) の調査では同じく釧路より東側の陸棚域に0歳魚群が多く分布するなど、調査時期によって例外も見られた。調査海域を日高湾東部まで拡大した後の2000年6月の調査では、道東海域だけではなく日高湾東部沿岸域においても1, 2歳魚の分布が確認された (Fig. 27)。日高湾東部海域における両年齢群の現存量推定値は、同期の道東海域における同一年齢群の現存量のそれぞれ0.65倍、1.27倍に相当した (Table 5)。しかし、翌2001年6月の調査 (Fig. 29) では、1歳魚以上の若齢魚の分布は襟裳岬周辺から釧路に至る道東陸棚域で多く観察され、日高湾沿岸域における分布量はごくわずかに留まった (Table 5)。

6月に実施した調査(1998年7月の調査を含む)では、噴火湾湾口部周辺海域から東部日高湾沿岸にかけて、大量のスケトウダラ0歳魚の分布が確認されたが (Fig. 27, 29)、同時期の道東海域においてスケトウダラ0歳魚の分布が確認されることはなかった (Fig. 19, 23, 25, 27, 29)。一方、2001年7月下旬に道東海域で実施した音響資源調査 (Fig. 30) では、1ヵ月前の2001年6月 (Fig. 29) には0歳魚の分布が確認されなかった襟裳岬東側～広尾にかけての水深30～50m付近のごく沿岸域において、大量の0歳魚群の分布が確認された。

12～1月の道東海域における調査では、初夏の調査で見られた1, 2歳魚に加え、0歳魚の分布も確認された (Fig. 21, 22, 24, 26, 28, 31)。日高湾海域においては、漁業との競合のため漁獲試験が実施できなかったものの、魚群反応の分布位置、水深およびスケトウダラ底刺し網漁業の漁況等からの類推によりスケトウダラ産卵親魚群と考えられる魚群反応が、噴火湾湾口部から日高湾の陸棚および斜面域にかけて分布する様子が捉えられた (Fig. 26, 28, 31)。なお、スケトウダ

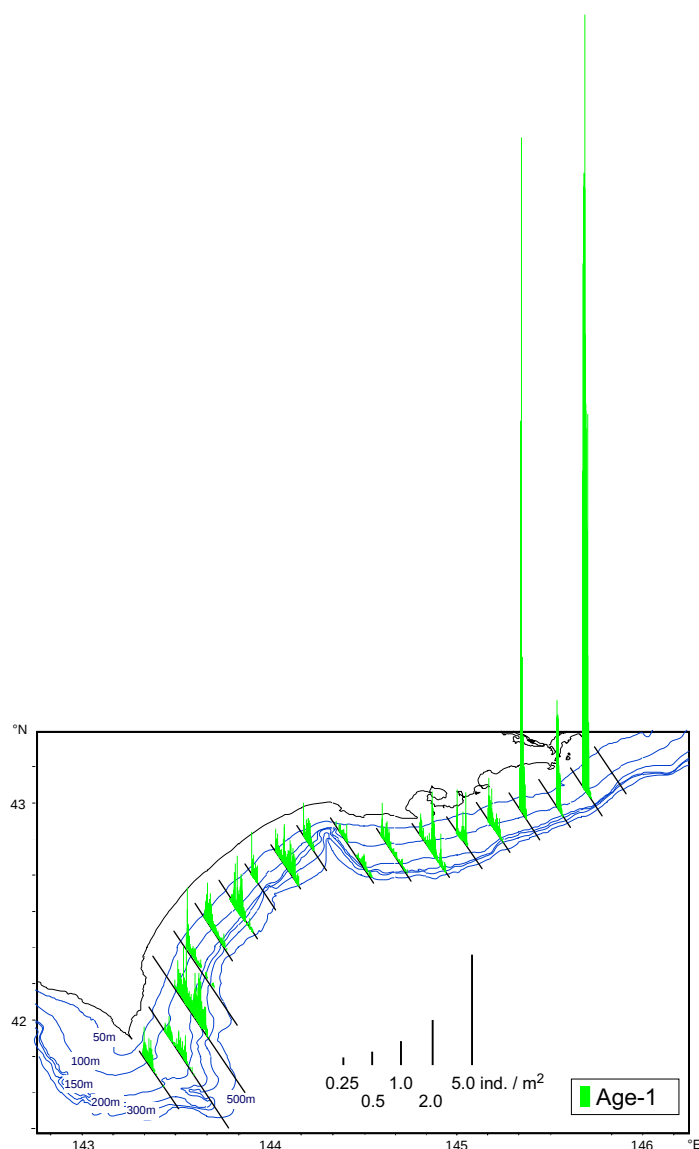


Fig. 19. Distribution pattern of age-1 walleye pollock in the Doto area in June 1996, estimated by acoustic survey during the daytime. Height of the green vertical bars indicates the density of age-1 walleye pollock. Because of the high abundance of age-1 walleye pollock compared with the other surveys, the height of bars are 1/10 scaled

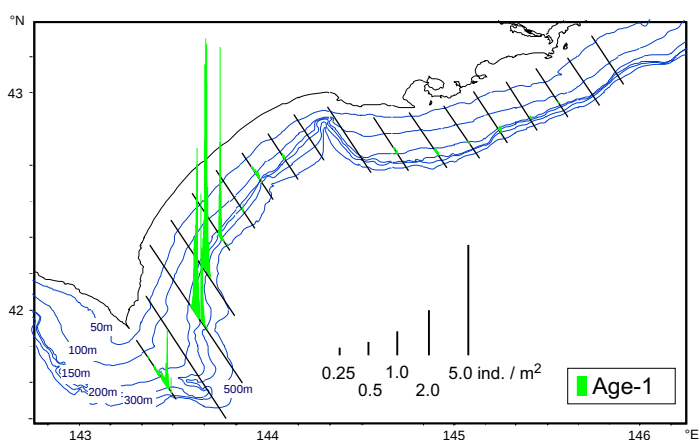


Fig. 20. Distribution pattern of age-1 walleye pollock in the Doto area in August 1996, estimated by acoustic survey during the nighttime. Height of the green vertical bars indicates the density of age-1 walleye pollock. Because of the high abundance of age-1 walleye pollock compared with the other surveys, the height of bars are 1/10 scaled

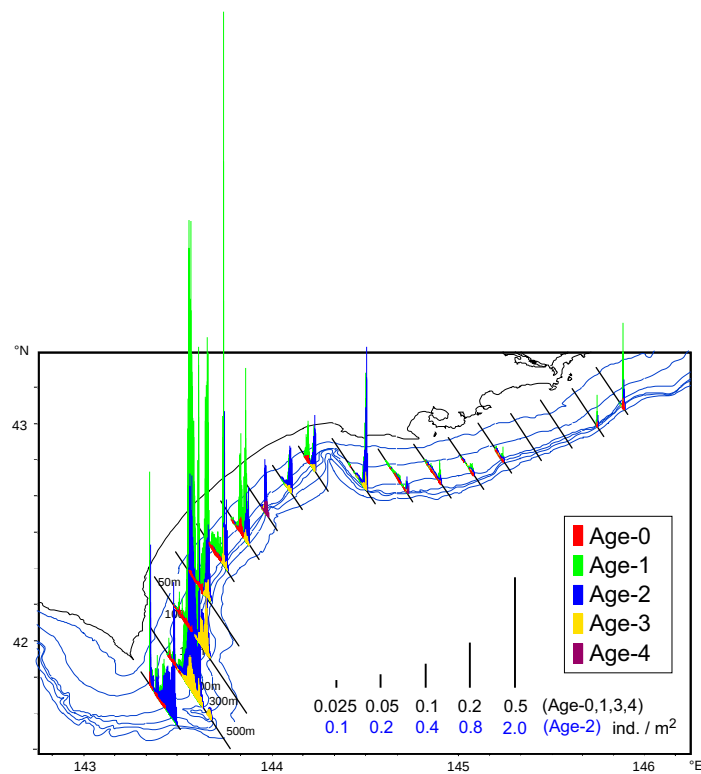


Fig. 21. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 4 in the Doto area in December 1997, estimated by acoustic survey during the nighttime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age. Because of the high abundance of age-2 walleye pollock compared with the other age groups, the height of bars for age-2 are 1/4 scaled

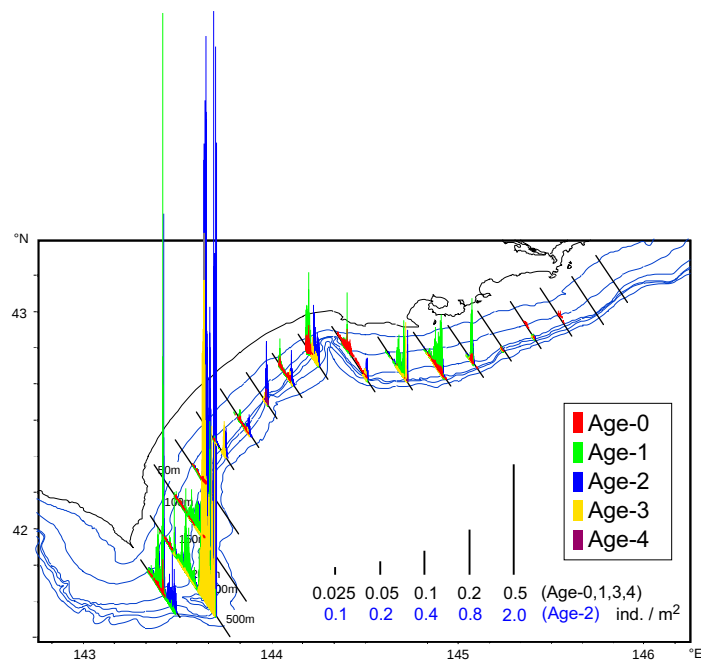


Fig. 22. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 4 in the Doto area in January 1998, estimated by acoustic survey during the nighttime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age. Because of the high abundance of age-2 walleye pollock compared with the other age groups, the height of bars for age-2 are 1/4 scaled

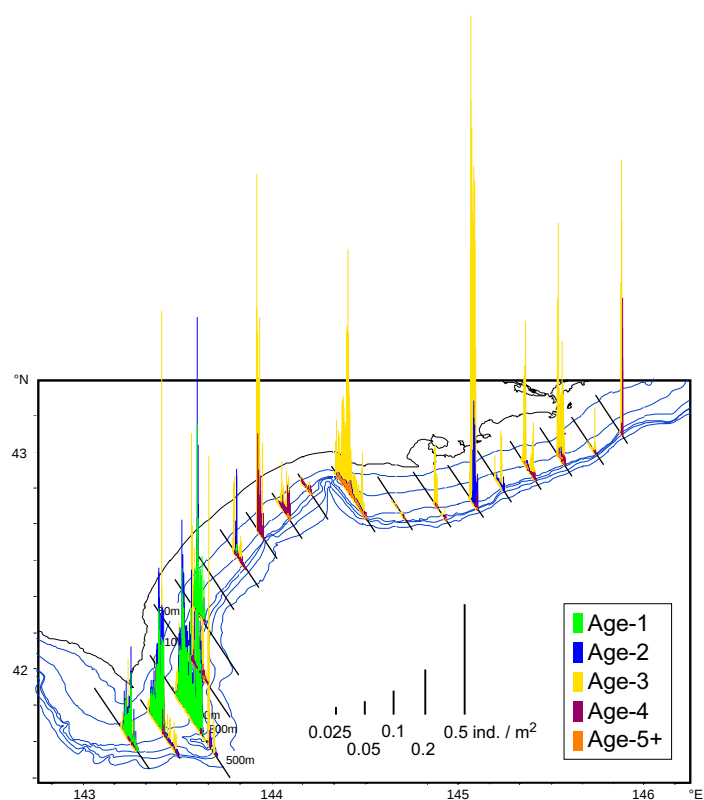


Fig. 23. Distribution pattern of walleye pollock for ages 1 to 5⁺ in the Doto area in July 1998, estimated by acoustic survey during the daytime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age

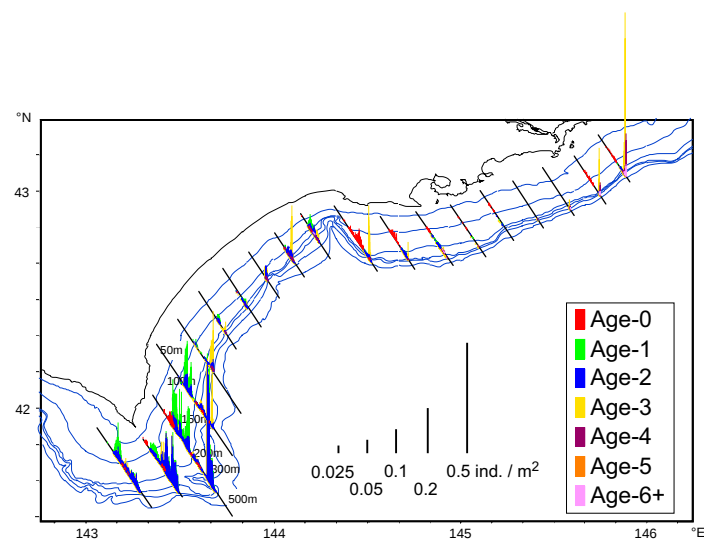


Fig. 24. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 6⁺ in the Doto area in January 1999, estimated by acoustic survey during the nighttime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age

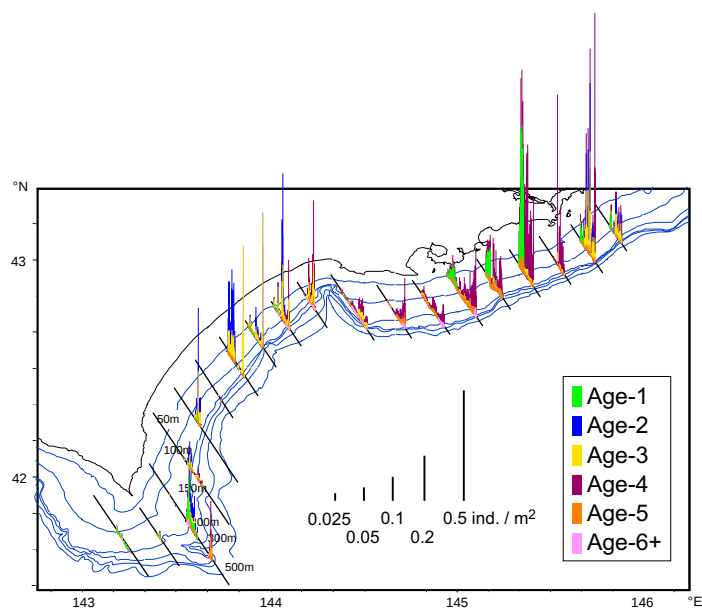


Fig. 25. Distribution pattern of walleye pollock for ages 1 to 6⁺ in the Doto area in June 1999, estimated by acoustic survey during the daytime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age

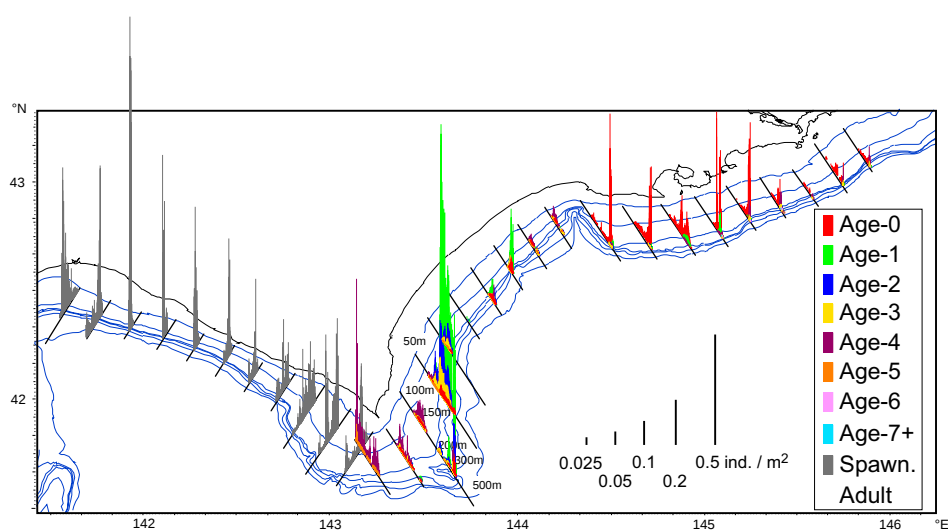


Fig. 26. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 7⁺ and spawning adults in the eastern part of Hidaka Bay and the Doto area in January 2000, estimated by acoustic survey during the nighttime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age

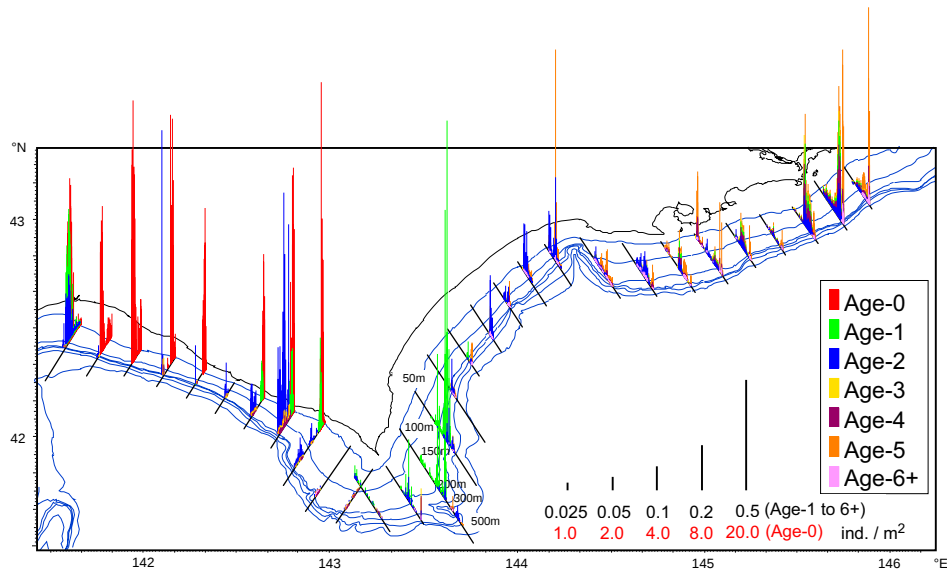


Fig. 27. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 6⁺ in the eastern part of Hidaka Bay and the Doto area in June 2000, estimated by acoustic survey during the daytime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age. Because of the high abundance of age-0 walleye pollock compared with the other age groups, the height of bars for age-0 are 1/40 scaled

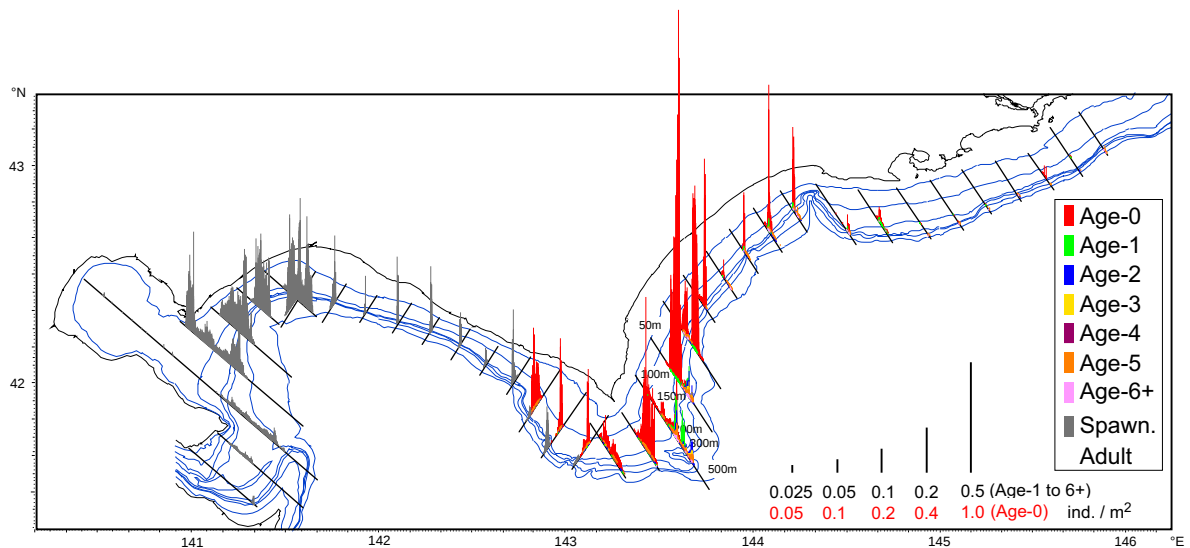


Fig. 28. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 6⁺ and spawning adults in Hidaka Bay and the Doto area in January 2001, estimated by acoustic survey during the nighttime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age. Because of the high abundance of age-0 walleye pollock compared with the other age groups, the height of bars for age-0 are 1/2 scaled

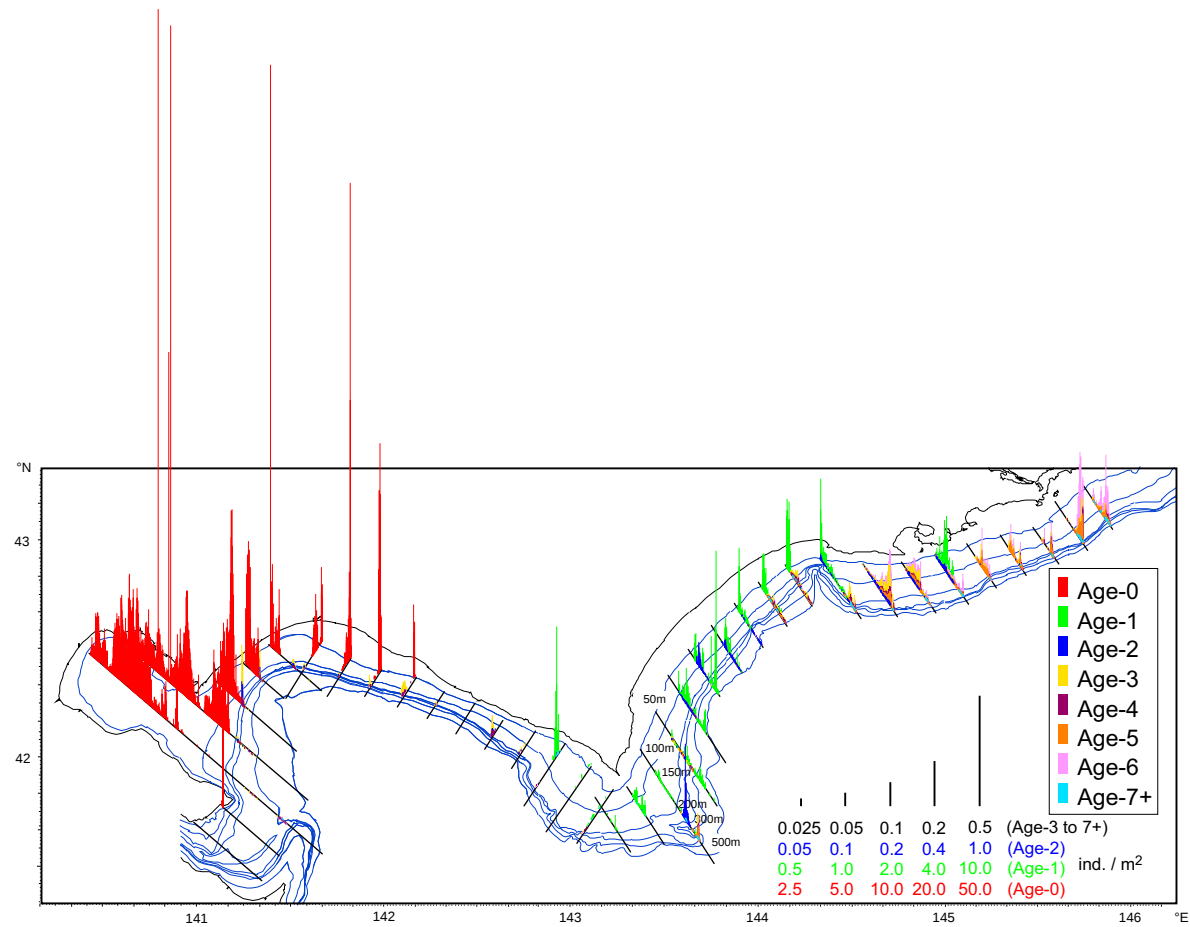


Fig. 29. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 7⁺ in Hidaka Bay and the Doto area in June 2001, estimated by acoustic survey during the daytime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age. Because of the high abundance of age-0 to 2 walleye pollock compared with the older age groups, the height of bars for age-0 are 1/100 scaled, age-1 are 1/20 scaled, age-2 are 1/2 scaled, respectively

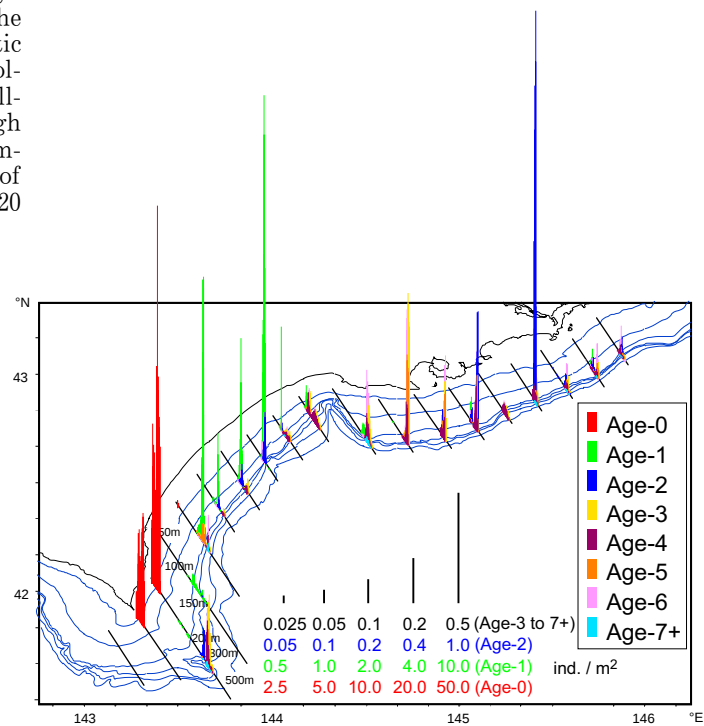


Fig. 30. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 7⁺ in the Doto area in July 2001, estimated by acoustic survey during the nighttime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age. Because of the high abundance of age-0 to 2 walleye pollock compared with the older age groups, the height of bars for age-0 are 1/100 scaled, age-1 are 1/20 scaled, age-2 are 1/2 scaled, respectively

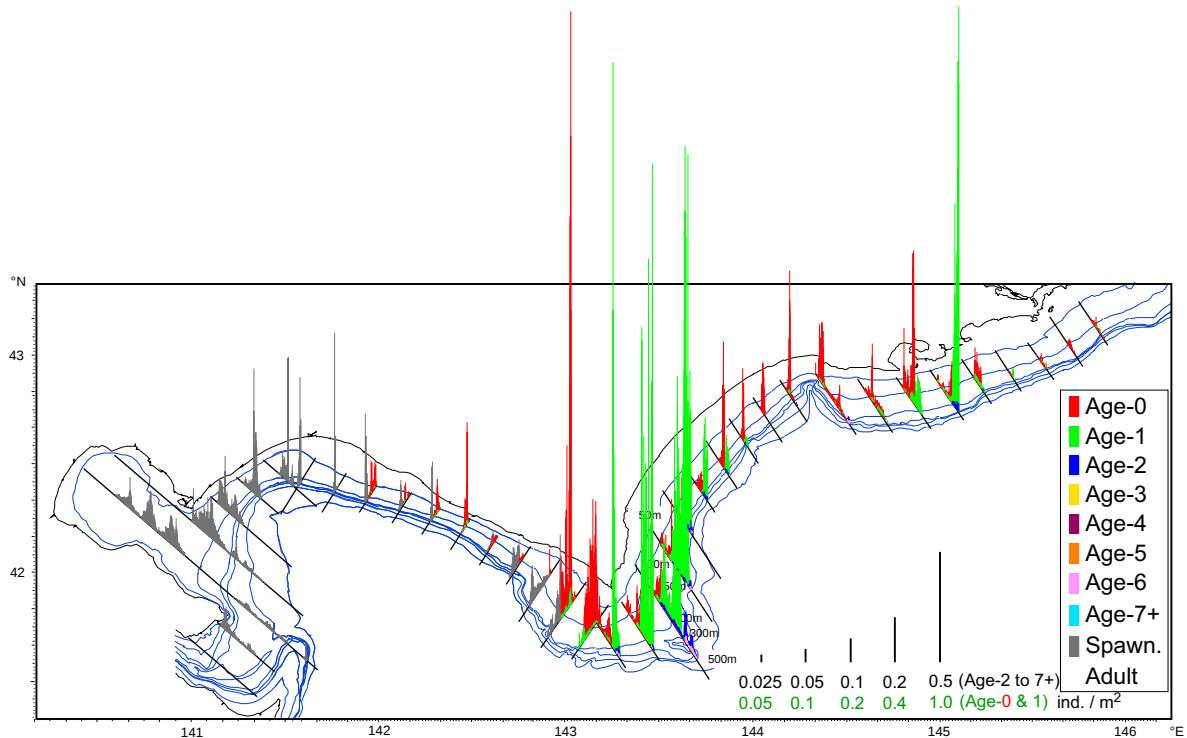


Fig. 31. Distribution pattern of walleye pollock for ages 0 to 7+ and spawning adults in Hidaka Bay and the Doto area in January 2002, estimated by acoustic survey during the nighttime. Height of the colored vertical bars indicates the density of walleye pollock at age. Because of the high abundance of age-0 and 1 walleye pollock compared with the older age groups, the height of bars for age-0 and age-1 are 1/2 scaled

ラ産卵親魚群と思われる魚群反応の量的表示にあたっては、漁獲試験による標本が得られておらず、直接的に尾叉長組成および平均TSを求めることができないため、以下に示す、当該海域における漁業によって得られた漁獲物の平均尾叉長を参考値として用いた。すなわち、2000年1月は静内沖ホッケ刺し網漁業におけるスケトウダラ混獲物の平均尾叉長451mmから $TS_{AVG} = -32.9dB$ を、2001年1月は室蘭沖で操業する沖底（かけまわし）によるスケトウダラ漁獲物の平均尾叉長435mmから $TS_{AVG} = -33.2dB$ を、また2002年1月は2001年1月と同じ値を使用した。

定線航走と併せて実施したトロール曳網による漁獲試験の結果、初夏および冬季のいずれの調査においても、浅い沿岸域に小型・若齢個体が多く分布し、沖合の陸棚縁辺部および陸棚斜面域に近づくほど大型・高齢の個体の割合が増加し、分布水深によってスケトウダラ魚群の年齢・サイズ組成が変化する傾向が見られた (Fig. 32)。一方、1996年6月および2001年6月の道東海域では、大量のスケトウダラ1歳魚（1995年級および2000年級）の魚群反応が、陸棚域にとどまらず、沖合の陸棚斜面域の中・表層まで連続的に分布する様子が観察された (Fig. 33, 34)。

いずれの海域・季節および年齢群においても、基本的には昼間に海底付近あるいは中層に密な魚群を形成

し、夜間に分散・浮上する日周鉛直移動が観察された (Fig. 32, 35, 36, 37)。特に、若齢魚においてその傾向は顕著で、1996年6月 (Fig. 35)、2001年6月 (Fig. 36) の調査では、昼間中層に分布するスケトウダラ1歳魚群が、夜間に表層付近まで浮上する様子が観察された。また、調査を実施した時期によって鉛直移動の範囲は大きく異なり、6月は近底層と表層の間で (Fig. 35, 36)、7月 (Fig. 37) および1月 (Fig. 32) には海底と中層の範囲で日周鉛直移動を行う様子が観察された。さらに、高齢・大型個体主体の魚群ほど着底傾向は強く、夜間においても海底付近に留まる個体が多く観察された (Fig. 36, 37)。

1996年および2001年の6月から7、8月にかけて道東海域で連続的に実施した調査から (Fig. 38, 39, 40)、時間の経過とともにスケトウダラの分布域が沖合へ移動する様子が観察された。1996年6月下旬に道東陸棚域に広く分布が確認されたスケトウダラ1歳魚（1995年級）は、同年8月の調査では分布域が襟裳岬南東部沖合の陸棚縁辺部および上部斜面域へと大幅に縮小した (Fig. 38)。また、2001年6月および7月に道東海域で実施した調査では、約1ヵ月の間に全ての年齢群において分布域が陸棚縁辺部あるいは陸棚斜面域上部へと移動し、かつ魚群の分布が狭い水深帯に集中する様子が観察された (Fig. 39, 40)。

一方、1997年12月および1998年1月の道東海域において実施した音響資源調査では、12月の時点では陸棚上に分布していた2歳魚（1995年級）の分布域が、1カ月の間により深い陸棚斜面域へ移動する様子が観察された（Fig. 41）。

スケトウダラ以外の魚種の分布

定線航走中、38kHzのエコーグラムにはほとんど何も映っていないにも関わらず、120kHzのエコーグラムにのみ強い魚群反応が出現する現象が観察された（Fig. 42）。中層トロールおよびボンゴネットによる標本採集の結果、これらはオキアミ類や動物プランクトン群集の反応と考えられた。動物プランクトンによると考えられる魚群反応は、夜間表層付近に分散して分布し、中・表層付近まで浮上したスケトウダラ魚群と混在する場合もしばしば観察された。

スケトウダラ若齢魚群と同時期に北海道太平洋海域に分布する魚種としては、1996年8月および1997年12月の調査時に道東陸棚域においてカタクチイワシの魚群の分布が確認された。昼間はイワシ類特有のまとまった魚群形状をしていることが多くみられたが（Fig. 43上、中図）、魚群によっては陸棚域の海底直上に層状に分布するものも見られた（Fig. 43下図）。また夜間は

スケトウダラと同様に分散して表層付近まで浮上する傾向がみられた。

水深300m以深の陸棚斜面域にはスケトウダラの魚群反応が出現することはほとんどなく、中深層性魚類やイトヒキダラの魚群反応が多く出現した。中深層性魚類の魚群反応は、スケトウダラの分布域よりも沖合側、陸棚斜面域の中層に、広範な雲状の反応として出現した（Fig. 44）。その分布位置および形状の特徴から、スケトウダラ魚群との判別は容易であった。イトヒキダラの魚群反応は主に水深300m以深の陸棚斜面域の海底直上に出現し、スケトウダラ魚群との間に比較的に明瞭な境界をもって分布する 경우가多く観察された（Fig. 45）。漁獲試験においても、分布の境界域付近における曳網では両種が混獲されることはあったものの、基本的にはどちらかの魚種に一方的に偏って漁獲される場合が多く、スケトウダラとイトヒキダラはある水深帯を境にそれぞれ別の魚群を形成していると考えられた。ただし、2種の分布の境界となる水深については季節や場所によって大きく異なり、特に釧路沖および襟裳岬周辺海域では、イトヒキダラの分布水深帯が水深200m以浅にまで至るケースもみられた（Fig. 45）。

Table 5. Standing stock of walleye pollock at age in the Pacific side of Hokkaido estimated from the acoustic surveys conducted in early—mid summer

Yr-class	Jun. 1996			Aug. 1996			Jul. 1998			Doto Jun. 1999			Jun. 2000			Jun. 2001			Jul. 2001		
	Day	Night	Age	Day	Night	Age	Day	Night	Age	Day	Night	Age	Day	Night	Age	Day	Night	Age	Day	Night	Age
1991							3.3	0.6	7												
1992							0.5	0.5	6												
1993							0.6	2.0	5	2.1	6.1	6+									
1994							31.6	35.4	4	16.1	18.4	5	5.0	13.5	6+	1.5	3.0	7+	1.3	1.9	7+
1995	2,796.8	1,743.6	1	642.3	917.4	1	376.4	437.8	3	185.8	139.4	4	99.7	149.4	5	70.7	75.0	6	49.6	72.0	6
1996							175.0	119.7	2	62.4	53.0	3	39.0	44.2	4	19.1	20.7	5	21.7	34.0	5
1997							120.0	67.9	1	85.9	53.6	2	53.5	57.6	3	22.5	27.1	4	18.3	29.7	4
1998										35.9	9.7	1	40.0	76.5	2	42.2	50.9	3	34.9	52.0	3
1999													65.2	33.9	1	23.8	19.5	2	28.4	102.1	2
2000																1,326.6	1,410.4	1	604.4	1,641.6	1
2001																			4,593.4	8,599.8	0

(×1,000,000 ind.)

Western part of Hidaka Bay					Eastern part of Hidaka Bay							
Yr-class		Jun. 2001			Yr-class		Jun. 2000			Jun. 2001		
		Day	Night	Age			Day	Night	Age	Day	Night	Age
1994 and Older		0.0	0.2	7+	1994 and Older		0.0	0.1	6+	0.2	0.0	7+
1995		0.3	1.3	6	1995		2.7	2.8	5	0.4	1.1	6
1996		0.5	0.9	5	1996		1.8	1.9	4	0.2	0.5	5
1997		0.7	1.8	4	1997		2.7	2.6	3	0.8	1.5	4
1998		4.2	4.8	3	1998		50.9	26.8	2	3.9	6.5	3
1999		2.9	1.7	2	1999		42.1	9.8	1	1.4	2.2	2
2000		3.6	1.9	1	2000		7,650.6	4,025.9	0	121.2	45.3	1
2001		33,127.6	27,064.0	0	2001					4,659.9	2,599.6	0
(×1,000,000 ind.)					(×1,000,000 ind.)							

(×1,000,000 ind.)

(×1,000,000 ind.)

北海道太平洋岸海域におけるスケトウダラの年齢別現存量の推定

調査によって得られたスケトウダラの年齢別昼夜別の現存量推定値を、調査時期および海域毎にまとめて Table 5 (6~8月), Table 6 (12~1月) および Fig. 46 に示した。6月(1998年のみ7月)に実施された調査結果を見ると、3歳以上の年齢群では、夜間のデータに基づく現存量推定値が昼間のデータに基づく現存量推定値を上回る傾向を示したのに対して、若齢魚群、特に1歳魚では、昼夜の現存量推定値がほぼ同程度か、むしろ昼間のデータに基づく現存量推定値が夜間のデータに基づく結果よりも高い値を示す傾向がみられた (Fig. 46)。1996年8月に実施した調査では、分布パターンの変化に現れた通り (Fig. 38)、スケトウダラ1歳魚の現存量推定値は、同年6月の調査結果に比べ昼夜

ともに大きく減少した (Table 5, Fig. 46)。また、1996年6月の調査では昼間の音響データに基づく現存量推定値が夜間のデータに基づく現存量推定値を上回っていたのに対して、同年8月の調査で得られた現存量推定値は昼夜ともにほぼ同程度の値を示した。2001年7月に実施した調査では、夜間のデータに基づく現存量推定値は同年6月を上回る値を示したのに対して、昼間のデータに基づく現存量推定値は、夜間のデータの4割弱まで減少し、調査を行った時間帯による現存量推定値の差が顕著に現れた。

一方、冬季に実施した調査では、1999年1月の調査結果を除き、全ての年齢群において夜間のデータに基づく現存量推定値が、昼間のデータに基づく現存量推定値を上回った。特に、2001年1月調査における0歳魚および2002年1月調査における1歳魚(ともに2000

Table 6. Standing stock of walleye pollock at age in the Pacific side of Hokkaido estimated from the acoustic surveys conducted in winter

Yr- class	Doto														
	Dec.1996	Jan. 1996	Jan. 1999			Jan. 2000			Jan. 2001			Jan. 2002			
	Night	Night	Age	Day	Night	Age	Day	Night	Age	Day	Night	Age	Day	Night	Age
1991				0.1	0.2	7									
1992				0.3	0.4	6									
1993	1.1	1.4	4	0.1	0.0	5	0.0	0.2	6+						
1994	39.6	108.9	3	1.8	3.7	4	1.4	3.3	5	0.7	1.0	6+	0.0	0.0	7+
1995	871.1	1,196.5	2	73.7	88.8	3	26.3	61.4	4	4.4	7.4	5	0.2	0.8	6
1996	391.6	156.2	1	61.6	61.2	2	15.8	27.0	3	1.5	2.8	4	0.1	0.3	5
1997	12.7	12.8	0	102.3	91.5	1	32.9	46.4	2	2.1	5.4	3	0.0	0.4	4
1998				2.6	7.7	0	68.0	129.9	1	2.9	11.7	2	0.3	1.1	3
1999							62.1	61.0	0	3.3	17.4	1	4.6	10.9	2
2000										32.4	436.6	0	447.6	707.9	1
2001													124.6	231.0	0
(×1,000,000 ind.)															

(×1,000,000 ind.)

Yr-class	Eastern part of Hidaka Bay							
	Jan. 2000		Jan. 2001			Jan. 2002		
	Day	Night	Day	Night	Age	Day	Night	Age
Spawn. Adults	232.6	196.7	29.2	30.1		26.2	46.2	
1994			0.0	0.0	6+	0.0	0.0	7+
1995			0.0	0.6	5	0.0	0.0	6
1996			0.0	0.3	4	0.0	0.0	5
1997			0.0	0.5	3	0.0	0.0	4
1998			0.0	0.2	2	0.0	0.0	3
1999			0.0	0.7	1	0.0	0.0	2
2000			1.3	66.0	0	4.5	8.3	1
2001						152.8	168.6	0

(×1,000,000 ind.)

Yr-class	Western part of Hidaka Bay			
	Jan. 2001		Jan. 2002	
	Day	Night	Day	Night
Spawn. Adults	155.2	133.3	111.2	85.6

(×1,000,000 ind.)

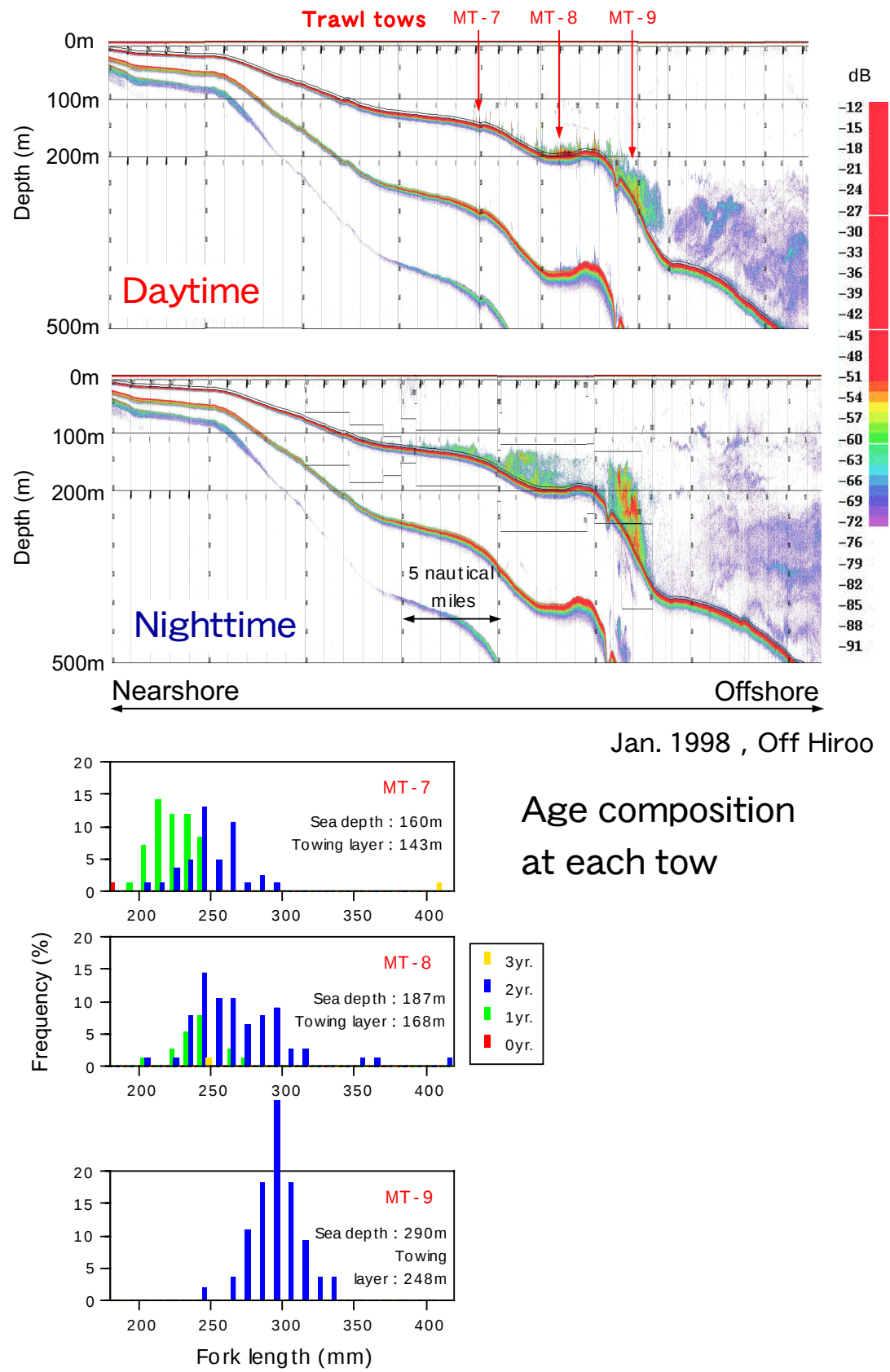
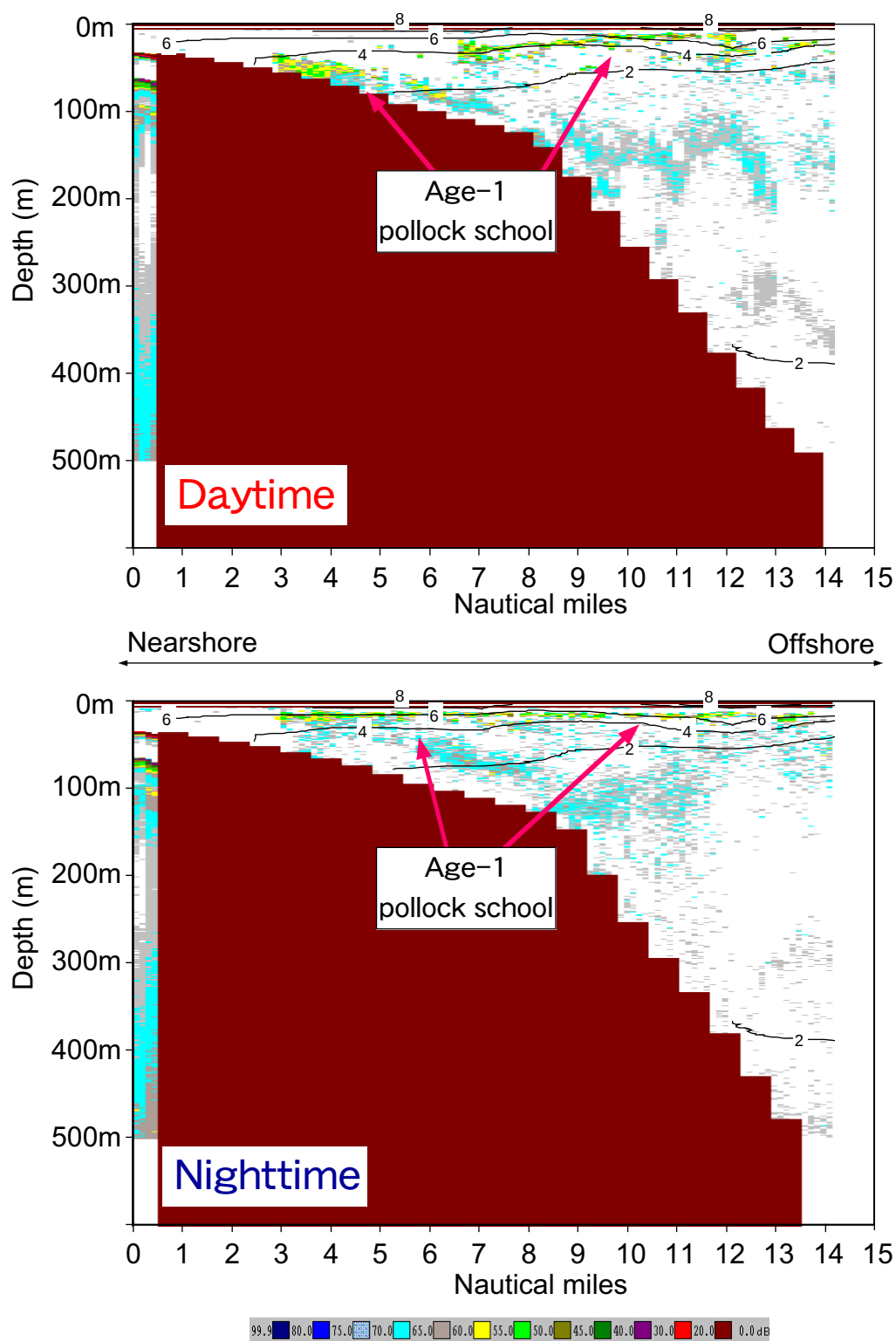


Fig. 32. The age specific bathymetric patterns of walleye pollock and their diel vertical migration on the continental shelf and shelf slope area in the Doto area, January 1998



Jun. 1996, Off Shiranuka

Fig. 33. Vertical sections of the echogram of age-1 walleye pollock school distributed continuously on both areas of the continental shelf and slope in June 1996. Contours and figures indicate vertical distribution of temperature

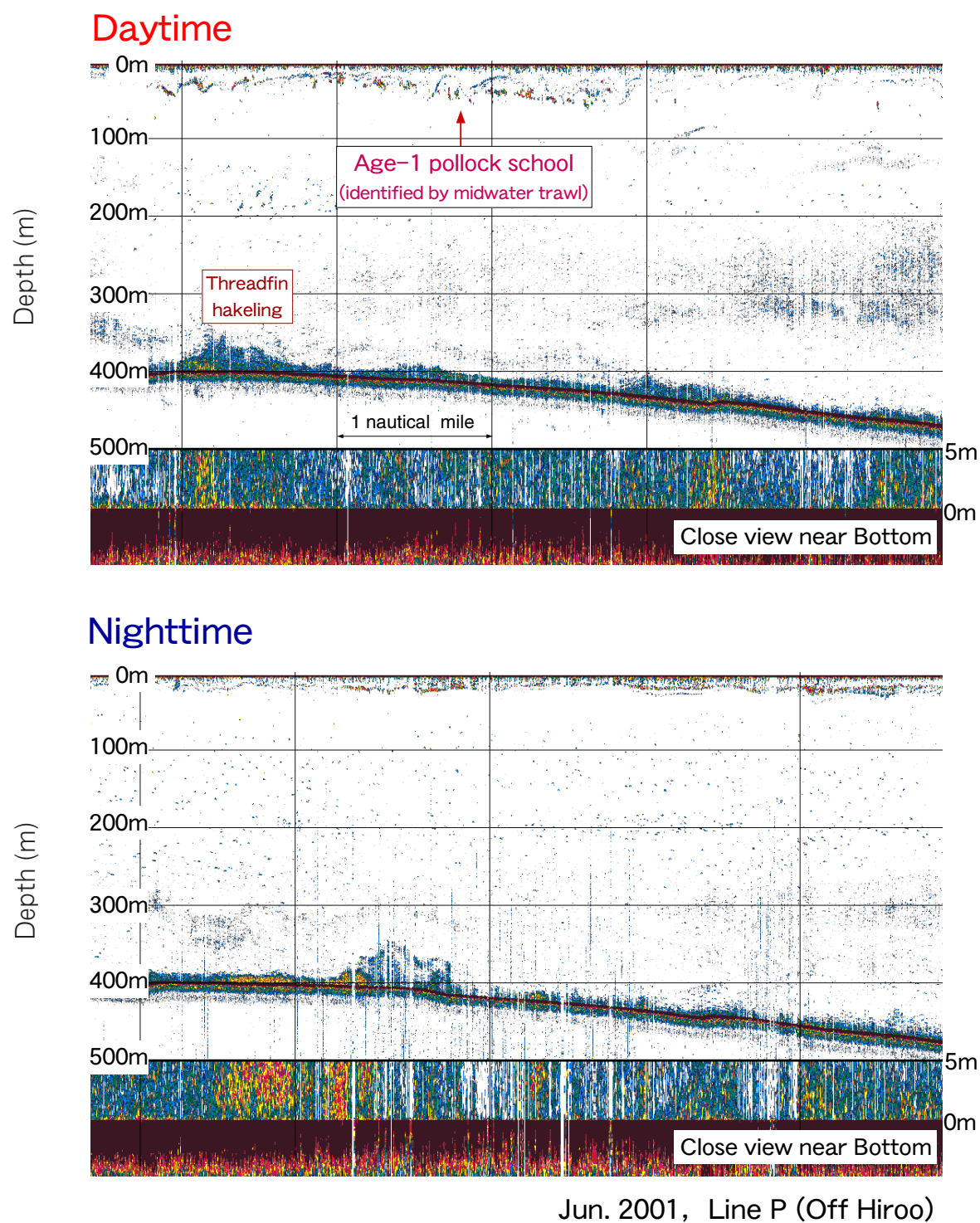
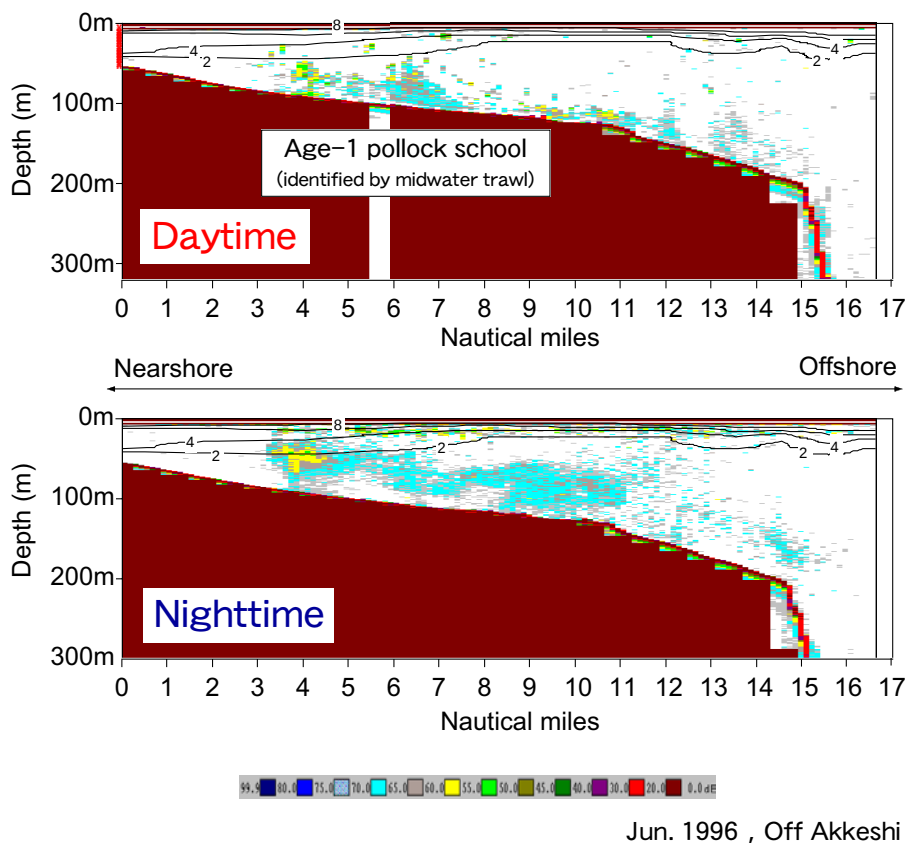
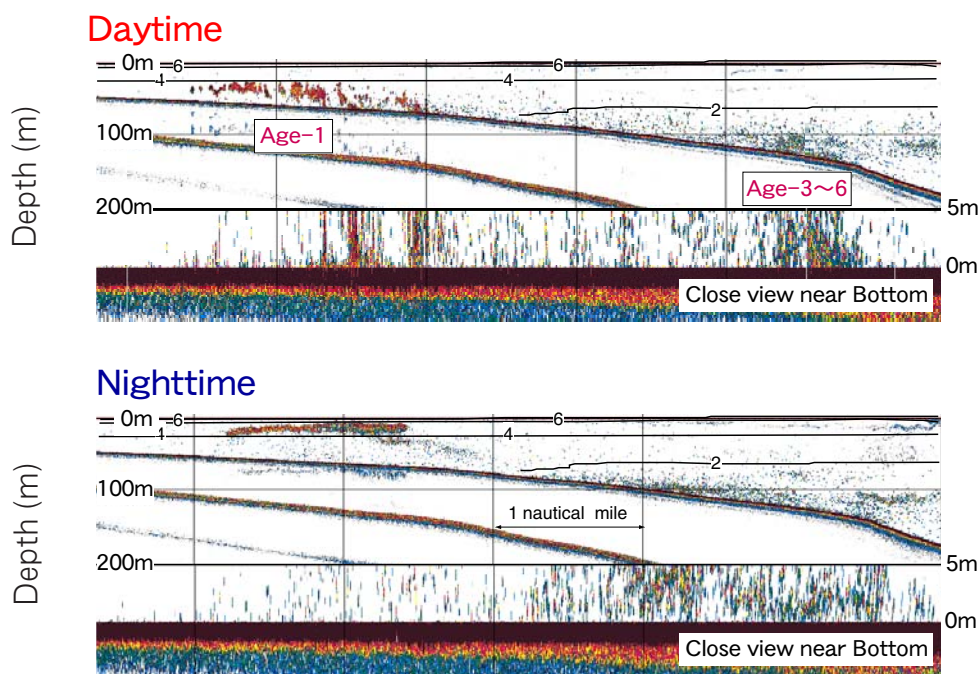


Fig. 34. Vertical sections of the echogram of age-1 walleye pollock school distributed in the surface above the shelf slope area of the Doto area in June 2001



Jun. 1996 , Off Akkeshi

Fig. 35. Diel vertical migration of age-1 walleye pollock school distributed on the continental shelf area in June 1996. Contours and figures indicate vertical distribution of temperature



Jun. 2001, Off Shiranuka

Fig. 36. Diel vertical migration of different age groups of walleye pollock schools on the continental shelf area in the Doto area, June 2001. Contours and figures indicate vertical distribution of temperature

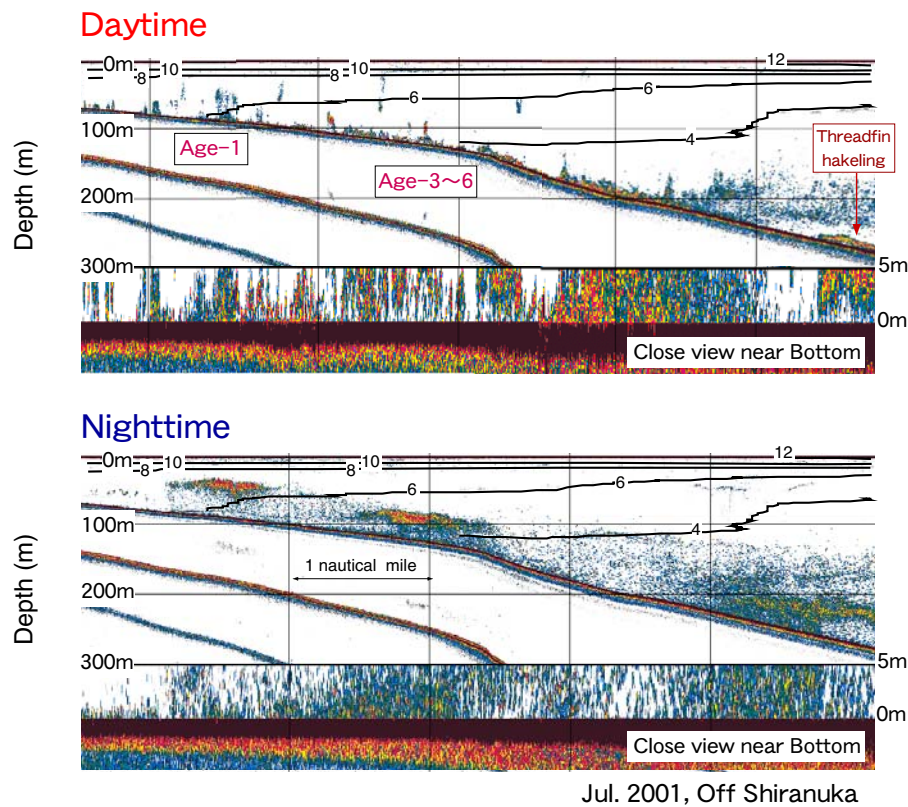


Fig. 37. Diel vertical migration of different age groups of walleye pollock schools on the continental shelf area in the Doto area, July 2001. Contours and figures indicate vertical distribution of temperature

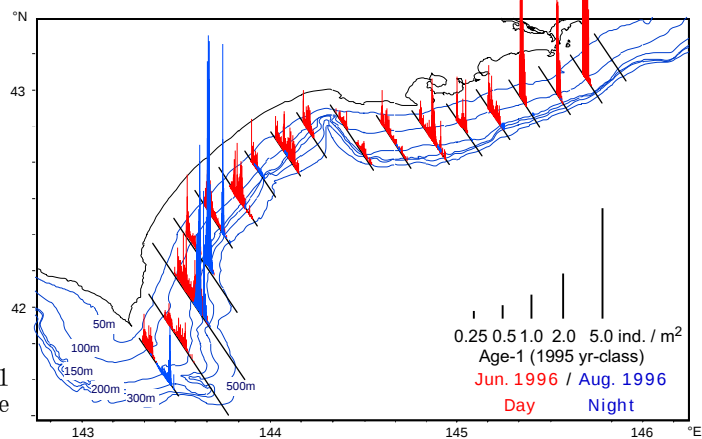


Fig. 38. Change of the distribution of age-1 walleye pollock schools (1995 yr-class) in the Doto area from June to August 1996

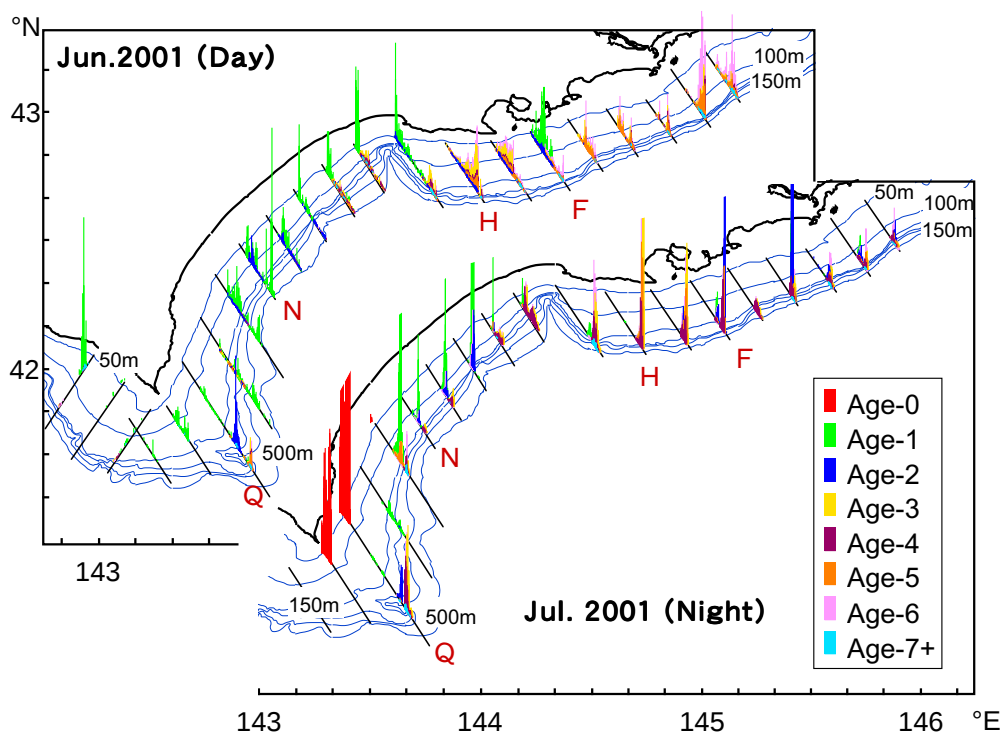


Fig. 39. Offshore oriented movement of walleye pollock in the Doto area from June to July 2001. Movements of walleye pollock in each age group at the transects marked by characters were shown in Fig. 40

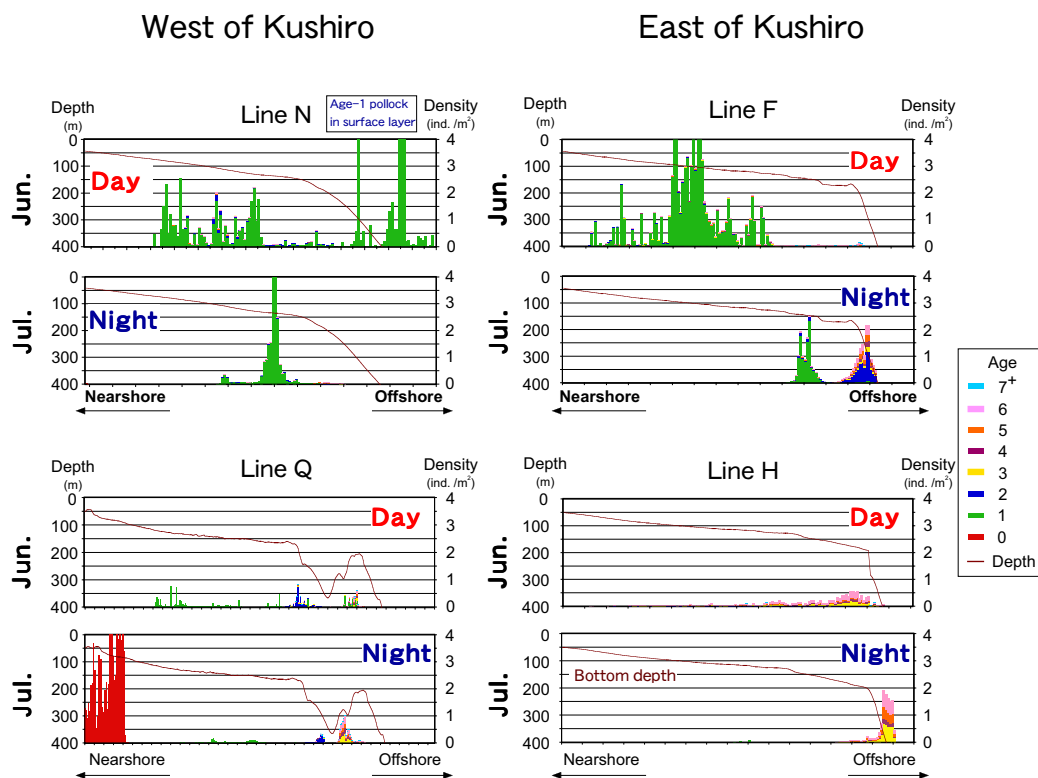


Fig. 40. Offshore oriented movements of walleye pollock in the Doto area from June to July 2001 on the same transects with bottom topography

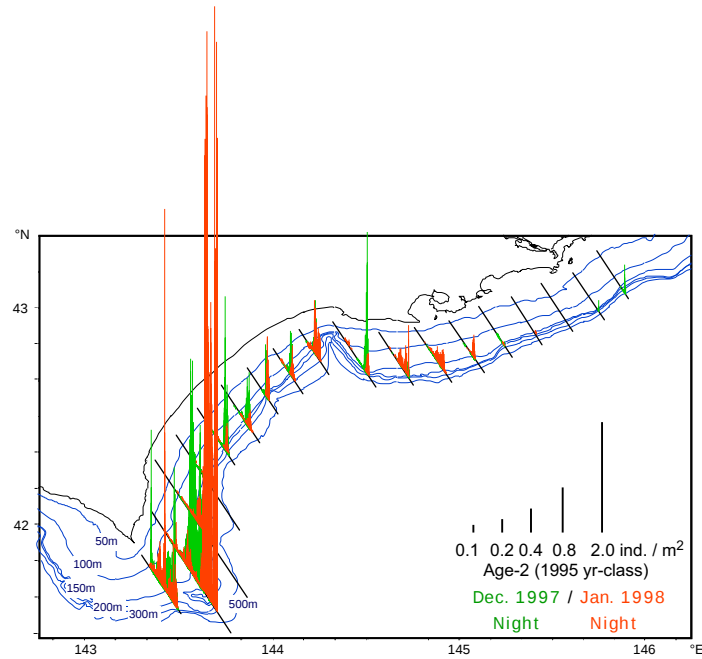
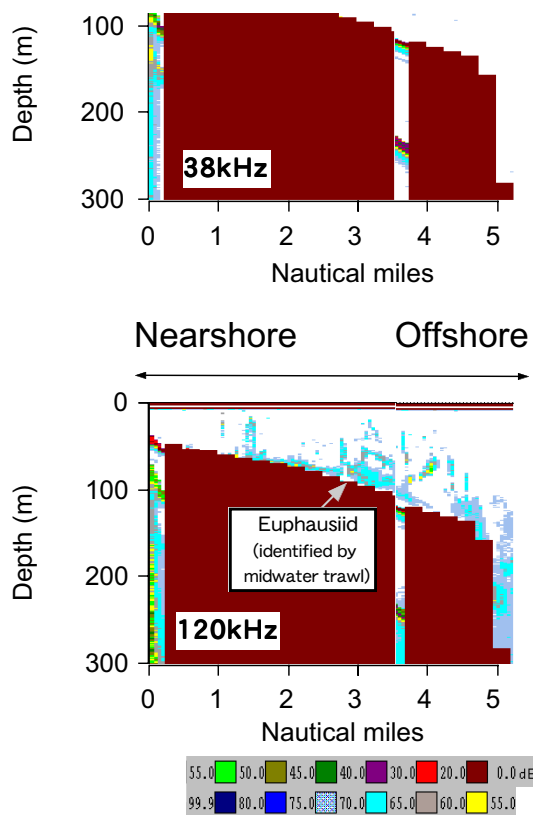


Fig. 39. Offshore oriented movement of walleye pollock in the Doto area from June to July 2001. Movements of walleye pollock in each age group at the transects marked by characters were shown in Fig. 40



Jun. 1996, Off Nosappu, daytime

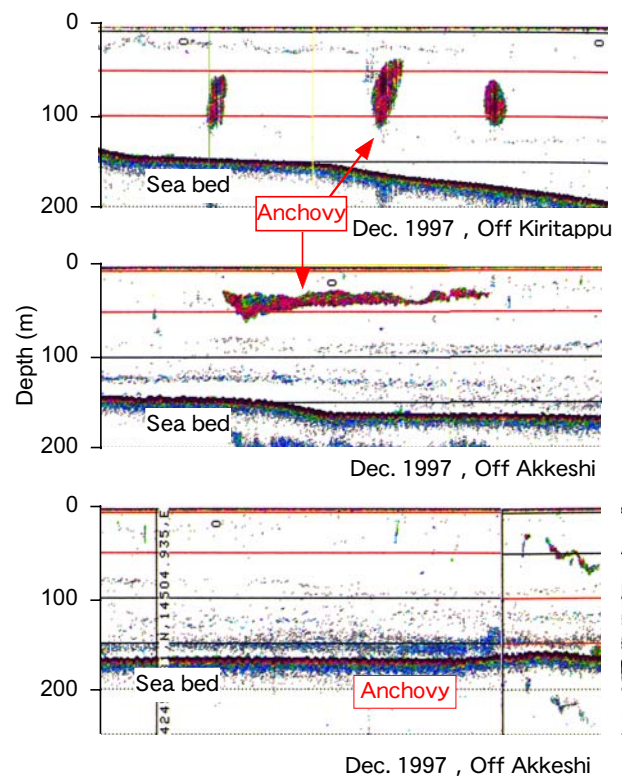
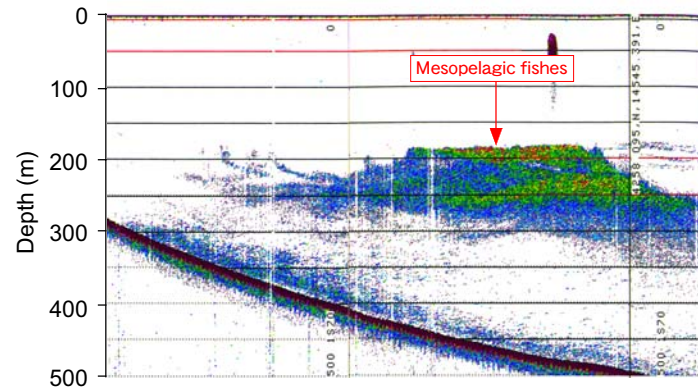
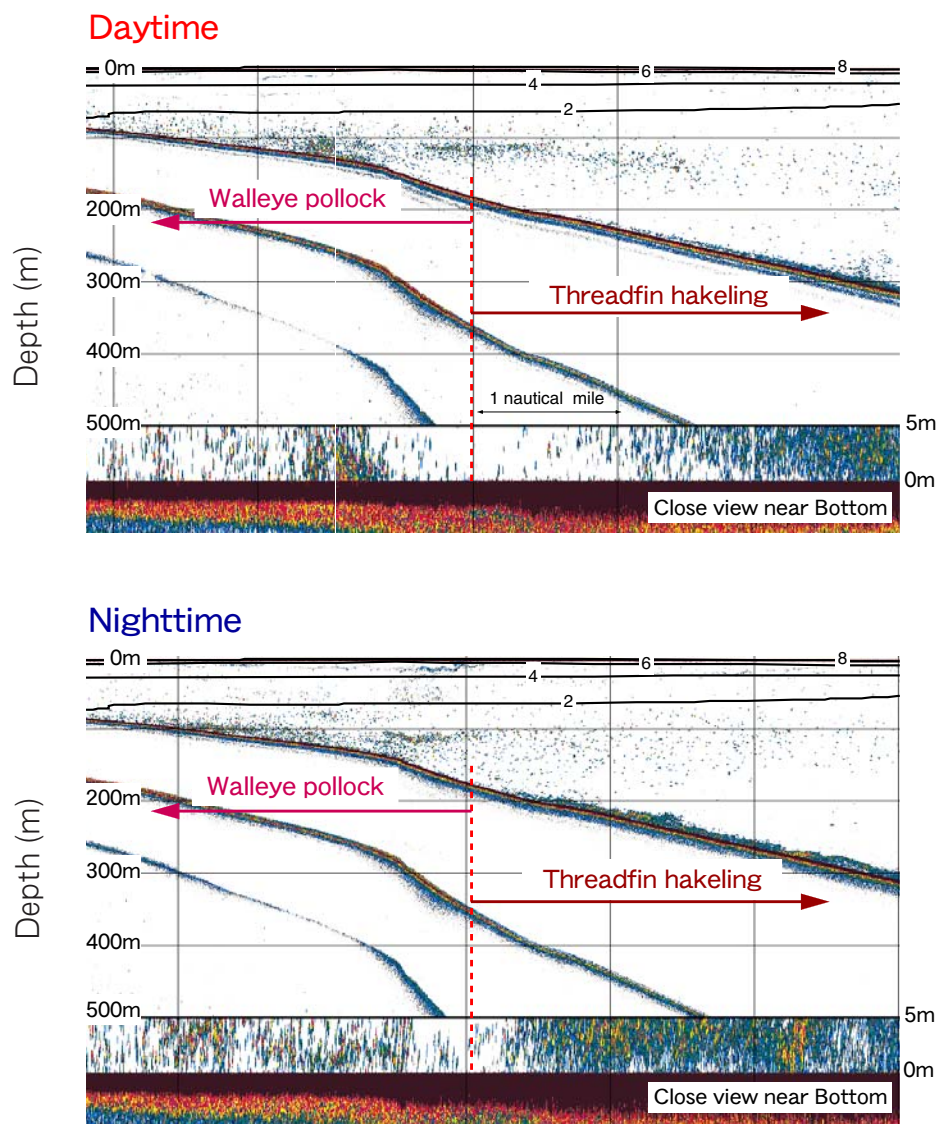


Fig. 40. Offshore oriented movements of walleye pollock in the Doto area from June to July 2001 on the same transects with bottom topography



Dec. 1997, Off Nosappu

Fig. 44. Echogram of mesopelagic fishes on the continental slope in the Doto area, December 1997



Jun. 2001, Off Shiranuka

Fig. 45. The boundary of the distribution of walleye pollock and threadfin hakeling on the continental slope in the Doto area, June 2001. Contours and figures indicate vertical distribution of temperature

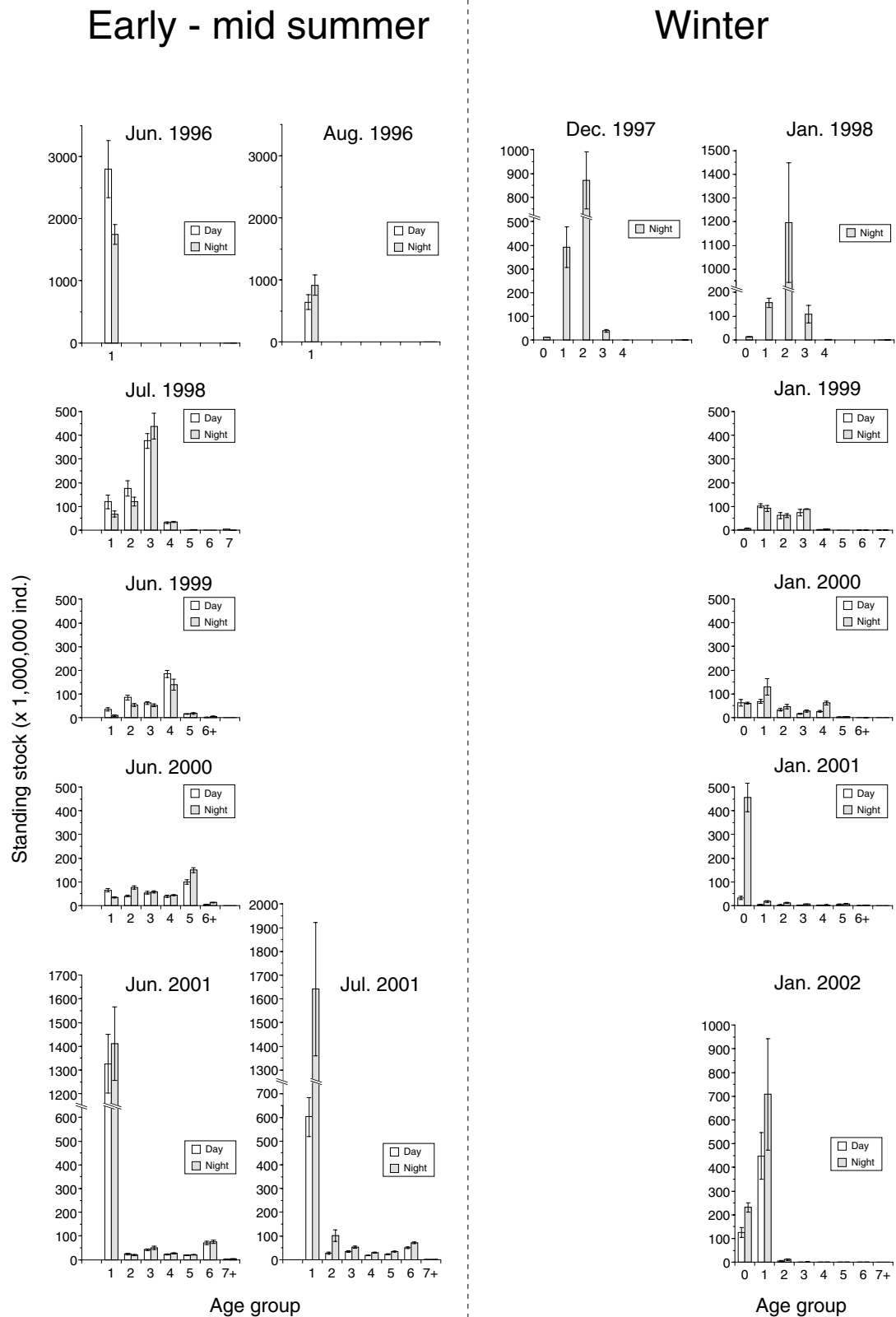


Fig. 46. Comparison of the result of stock estimation of walleye pollock at age in the Doto area by the acoustic surveys between the time period that the acoustic data were collected. Fine lines on the top of the bar indicate SEM of the estimated stock by 1-D transitive method. Only the data collected in nighttime was analysed in two surveys conducted in December 1997 and January 1998

年級)のように、大量の若齢魚が分布した場合に、昼夜による現存量推定値の差が顕著に現れる傾向が見られた。

これらの結果を調査の時系列にしたがって並べ、道東海域における同一年級の現存量推定値の季節変化を示した (Fig. 47)。前述したように、調査を実施した季節によって昼夜の現存量推定値に差異が生じていた。このことから、より多くの現存量推定値を得た時間帯を採用することを目的とし、6月 (1998年のみ7月) の調査については昼間のデータに基づく年齢別現存量推定値を、また盛夏および冬季の調査については夜間のデータに基づく年齢別現存量推定値を対象として用いた。また、1995年級および2000年級の豊度が他に比べて極めて高かったことから、グラフの縦軸のスケールを2億尾未満とそれ以上とで変更して示した。その結果、音響資源調査によって推定された道東海域における同一年級の現存量推定値は、1998年1月の調査における3歳魚 (1994年級) および2000年1月の調査における1歳魚 (1998年級) の例を除いて、1月の調査では前年6月の調査時に比べ現存量推定値が大きく減少し、6月の調査で再び増加するジグザグのパターンで推移した。

考 察

1996年調査時の魚群反応を全て1歳魚群とした処理の妥当性

1996年6月に実施した音響資源調査では、スケトウダラ若齢魚と考えられる魚群反応が道東海域の陸棚上

一面に広く連続的に分布していた (Fig. 15)。一方、陸棚上で実施された漁獲試験において採集されたスケトウダラの多くが1歳魚 (1995年級) と考えられる体長範囲であった (Fig. 16)。このことから、道東陸棚上に分布した魚群反応のほぼ全てをスケトウダラ1歳魚の魚群と判断し、陸棚域での各曳網で得られたサンプルにおけるスケトウダラ1歳魚の平均尾叉長から求めた TS_{AVG} を用いて尾数に換算した。1996年8月の調査結果についても同様の方法で海域内の魚群反応をスケトウダラ1歳魚の尾数に換算した。この方法は、翌1997年以降に実施した調査における年齢別現存量推定の過程と、以下の点において異なっていた：

- ・漁獲標本における年齢組成比の判断に、耳石年輪を用いた年齢査定結果ではなく、尾叉長組成を用いた。
- ・個々の魚群反応と漁獲試験に基づく年齢組成・年齢別尾叉長組成の対応が一对一でなく、調査海域内に分布する全ての魚群反応を一つの TS_{AVG} を用いて尾数に換算した。
- ・漁獲された標本の殆どがその体長範囲から1歳魚と判断されたことより、陸棚上に分布した魚群反応を1歳魚のみに振り分けて尾数に変換した。

以上の相違点のうち、尾叉長組成による年齢組成の判断については、得られた尾叉長組成 (Fig. 16, 18) における複数のサイズグループが、それぞれ1, 2および3歳魚以上の平均尾叉長に対応したことから、高齢群の年齢組成を必要としない場合には、尾叉長組成に基づく年齢組成比の判断は十分有効であると考えられた。二点目の魚群反応と漁獲試験結果との対応付けについ

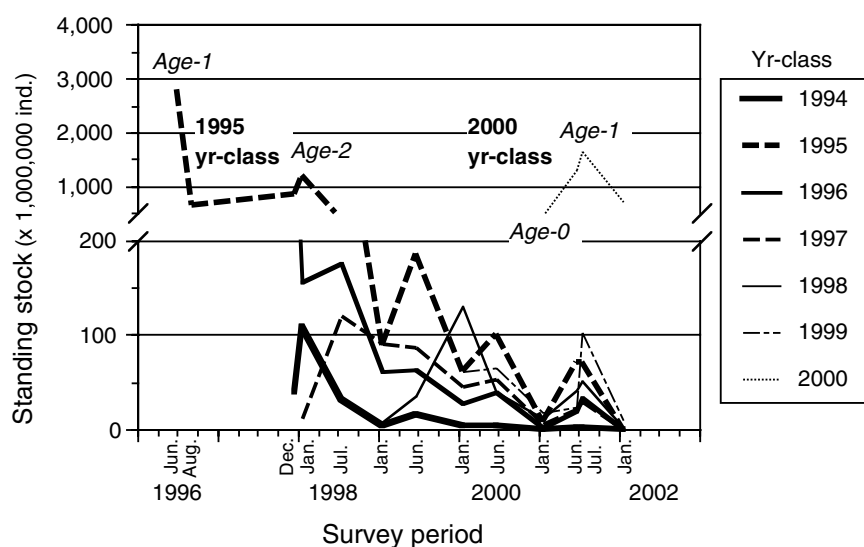


Fig. 47. Changes of the estimated stock abundance of the same cohort at each survey. Because of the high abundance of 1995 yr-class and 2000 yr-class, scale of Y-axis was changed above and below 200 million individuals

ては、1996年に実施した音響資源調査における漁獲試験の実施頻度が少なく（Table 4）、また実施海域に偏りがあり（Fig. 15, 17）、調査海域内での魚群の分布位置に応じた年齢・体長組成の違いを十分に示すだけの情報を得るに至らなかったことが最大の要因であった。Fig. 16およびFig. 18に示した曳網試験毎の尾叉長組成では、同じ1歳魚群であっても分布位置によって尾叉長のモードに2 cm程度の違いが見られたが、これは TS_{AVG} では約1 dB、尾数換算上は1.26倍程度の差を生じる原因となりうる。実際には、同じ年齢群でありながら体長組成が大きく異なった漁獲標本は一部に限られ、海域全体での現存量推定値に及ぼす影響は大きくないと考えられる。しかし、本来、できる限り多くの魚群反応に対して漁獲試験を行い、個々の魚群反応における年齢組成および年齢別尾叉長組成の違いを魚群反応量の尾数換算に反映させていくことが、より正確な現存量評価を行ううえで必要である。三点目の年齢分解に関する問題は、漁獲標本によっては2歳魚以上の可能性のあった大型個体が見られたにも関わらず、全ての魚群反応を1歳魚の反応として解釈した点にある。1996年6月の調査における曳網標本MT-5では、1歳魚の他に尾叉長20 cm以上の、2歳魚以上の可能性のある個体も同時に漁獲された（Fig. 16）。これらの個体は、1歳魚の尾叉長範囲と2歳魚の尾叉長範囲の中間に位置し、尾叉長だけでは年齢判断が困難であった。また、同調査においては魚群反応が陸棚上およびその沖合の中層まで大量かつ連続的に分布しており、分布位置や水深帯によって個々の魚群に区別して認識することが難しかった。一方、陸棚上での曳網において尾叉長20 cm以上の個体が多く漁獲されたのはMT-5のみであり、かつ近接する位置での曳網（MT-3, 4, 7）では1歳魚のみが漁獲されている（Fig. 15, 16）。このことから、MT-5の漁獲位置における魚群反応についても、他の曳網結果と同様に全ての魚を1歳魚と見なして尾数換算を行った。もし、これらの尾叉長20 cm以上の個体が2歳魚以上の年齢群であった場合には、少なくともこの付近の魚群反応の解釈においては2歳魚以上を過小推定し、また1歳魚を過大に推定したことになる。しかし、1996年の調査時に1歳魚であった1995年級は卓越年級であり、1996年時点のスケトウダラ太平洋系群における年齢別資源尾数（0歳魚を除く）に占める1歳魚の割合は6割を占め、2歳魚（1994年級）と比較しても2.5倍の資源豊度に値した（Fig. 2）。VPAで推定される年齢別資源尾数はスケトウダラ太平洋系群全体での値であり、道東海域に分布する魚群の年齢構成と必ずしも一致するものではないが、同様の年齢組成比が1996年初夏の道東陸棚域におけるスケト

ウダラ魚群に当てはまると仮定すると、同海域における1歳魚の分布尾数は2歳魚の資源尾数よりも相当に多かったことが想像される。また調査で得られた魚群反応の分布の重心は、MT-5から遠く離れた納沙布岬沖の水深100 m以浅の浅海域であったことから（Fig. 15）、実際にMT-5付近における1歳魚の現存量推定の結果が海域全体の現存量推定値に与える影響は小さかったと考えられる。以上の理由から、MT-5付近における魚群反応も含めて全ての魚群反応を1歳魚群と見なした判断は、同海域における2歳魚群の現存量を推定する上では明らかに過小推定であり問題が残るものの、1歳魚群の現存量推定においてはそれほど大きな誤差要因とはならず、個々の魚群における年齢・サイズ組成を明らかにするだけの漁獲試験を行えなかった条件下では妥当な処理であったと考える。また、1996年8月の調査結果における魚群反応の解釈については、魚群反応の分布域自体が襟裳岬東方のごく狭い海域に限られ（Fig. 17）、さらに高豊度の魚群反応に対する漁獲試験をMT-8のみしか実施していない。このことから、この曳網結果における年齢組成および平均尾叉長に基づき、調査海域内の魚群反応をスケトウダラ1歳魚として尾数変換した。結果的に、ただ1回の漁獲試験の結果に基づいて全ての魚群反応の年齢組成およびサイズを判断することになり、年齢組成および TS_{AVG} の設定における誤差は、同年6月における調査結果の解釈よりも大きくなった可能性は否めない。

北海道太平洋側海域におけるスケトウダラ若齢魚の分布海域および水深

一連の音響資源調査の結果、北海道太平洋岸の陸棚～陸棚斜面域に分布するスケトウダラ魚群における、サイズ・年齢組成と分布水深との関係が示された。すなわち、年齢あるいはサイズが小さい個体は沿岸よりの陸棚上に分布し、体サイズが大きくなるにつれて分布域がより深い、陸棚縁辺部および陸棚斜面域へと移行した。この結果は、道東海域の陸棚～陸棚斜面域（渡辺ら、1993; 志田、2002）および日高湾沿岸（佐々木、長澤、1993）における既往知見と一致した。このような体サイズと分布水深の関係は、北海道太平洋岸に分布するスケトウダラに限らず、大西洋タラおよびその他の底魚においても観察されており（Macpherson and Duarte, 1991; Swain, 1993）、底魚類の分布においては一般的な傾向であるといえる。年齢・サイズと分布水深との対応を考慮すると、北海道太平洋岸においてスケトウダラ若齢魚群を対象とした音響資源調査を設計する場合には、若齢魚群が多く分布すると考えられる陸棚域に調査努力量を集中させるのが効率的とも考

えられる。しかし、1996年6月および2001年6月の調査では、スケトウダラ1歳魚が陸棚域のみならず沖合の表中層域まで連続して分布する事例も観察された (Fig. 33, 34)。初夏の道東海域においてスケトウダラ1歳魚の分布域が陸棚上にとどまらず、沖合域まで連続的に分布する様子が確認されたのは1996年および2001年の6月のみで、両年ともに1歳魚の年級豊度が非常に高かったことが他の年と大きく異なる点である (Table 5)。したがって、この現象は、初夏の道東海域に大量の1歳魚が分布した場合にのみ起こりうる特殊な例とも考えられる。しかし、若齢魚の年級豊度については、実際に音響資源調査を実施した結果として分かることであり、調査前には若齢魚群の豊度や、沖合域に若齢魚群が分布するか否かについての情報を得ることが不可能である。このことを考慮すると、調査設計の段階から若齢魚の分布が少ないと予想される沖合域についても陸棚域と同様に調査に含めておき、沖合域における魚群反応の有無およびその年齢組成を実際に確認することが望ましい。

道東海域におけるスケトウダラ1~2歳魚の分布は、一部の例外年 (1996年6月, Fig. 19; 1999年6月, Fig. 25) を除いて、襟裳岬周辺から釧路沖にかけての道東海域西部の陸棚上で多く観察された。しかし、調査海域を日高湾沿岸海域まで拡大した2000年6月の音響資源調査では、日高湾東部の陸棚上において、同時期の道東海域と同程度あるいはそれを上回る量の1, 2歳魚の分布が観察された (Table 5, Fig. 27)。さらに、翌2001年6月に実施した調査では、日高湾沿岸海域では襟裳岬周辺の陸棚域を除いて1, 2歳魚の分布は捉えられず (Table 5, Fig. 29)、日高湾沿岸におけるスケトウダラ若齢魚群の分布は年変動が大きいことが明らかとなった。佐々木、長澤 (1993) は、1970~1980年代に実施した試験操業の結果から、日高湾西部海域に0~2歳のスケトウダラ若齢魚群が周年分布することを示した。同調査の対象海域には日高湾東部海域が含まれておらず、また若齢魚の分布量についての量的な評価を行っていない。そのため、日高湾と道東海域との間でスケトウダラ若齢魚の分布量の比較を行うことはできないが、初夏の日高湾海域にスケトウダラ若齢魚が分布することが2000年6月に限った現象ではないことがこの知見から予想される。現段階では、初夏の日高湾海域における音響資源調査は2000年および2001年6月の2年しか行われておらず、さらに両年でスケトウダラ若齢魚の分布パターンおよび分布量が大きく異なり、日高湾におけるスケトウダラ若齢魚群の分布量が太平洋系群全体としての若齢魚の年級豊度に占める割合および現存量推定に与える影響について論議する

には情報が不足している。しかしながら、少なくとも2000年6月の調査において、同時期の道東海域に分布する量と同程度の若齢魚の分布が日高湾沿岸域において確認されたことは、スケトウダラ太平洋系群全体としての若齢魚年級の豊度を捉えるという本研究の目的からすれば、日高湾における若齢魚の分布は十分に考慮すべき問題であることは確かである。今後も道東海域と併せて日高湾沿岸における調査を継続し、両海域間における若齢魚の分布量、およびその量的比率についてのデータを積み重ねたうえで、改めて日高湾沿岸に分布するスケトウダラ1, 2歳魚の扱いについて検討する必要がある。

北海道太平洋海域におけるスケトウダラ0歳魚の分布については、6月の時点では噴火湾湾口部および日高湾のごく沿岸域で確認されたものの (Fig. 27, 29)、同時期の道東海域においては0歳魚の分布が確認された年はなかった (Fig. 19, 23, 25, 27, 29)。一方、2001年7月に道東海域で実施した調査では (Fig. 30)、襟裳岬周辺のごく沿岸域において大量の0歳魚の分布が捉えられた。さらに冬季の調査では (Fig. 21, 22, 24, 26, 28, 31)、量的な多寡は別として、いずれの年についても道東海域で0歳魚の分布が見られた。志田、西村 (2002) およびNishimura *et al.* (2002) は、夏季から秋季にかけての道東海域に分布するスケトウダラ0歳魚の耳石日周輪を用いて孵化時期を推定した結果、道東海域に分布する0歳魚の大半が噴火湾湾口部産卵場で産まれた個体である可能性を明らかにした。また本田 (2002) は、漁業者を対象としたアンケート調査を実施し、道東海域におけるスケトウダラ0歳魚の混獲情報は秋以降には多く寄せられたものの、夏以前の時期には1箇所を除いて発見事例が得られなかったことを示した。これらの結果を考慮すると、2000年および2001年の6月に日高湾沿岸で、また2001年7月に道東襟裳岬周辺沿岸域で捉えたスケトウダラ0歳魚の魚群は、噴火湾湾口部で孵化した後、道東海域へ移動する途中の魚群を捉えた可能性があり、初夏の時点では道東海域への来遊が完了していないと考えられた。道東海域に分布するスケトウダラ0歳魚の由来や移動の経路については、現時点では知見も少なく、今後更なる調査が必要である。また、北海道太平洋岸以外の海域にどの程度のスケトウダラ0歳魚が分布しているかについても明らかではない。しかし、少なくとも太平洋系群における0歳魚の現存量を推定する場合には、6月の道東海域という時期と海域の組み合わせによる調査は、魚群分布域の全体を捉えるには不適當であることが示唆された。6月の調査における主たる調査対象年齢群は1歳魚以上に設定すべきである。

魚群の日周鉛直移動が現存量推定に与える影響

本研究において実施した音響資源調査では、いずれの季節、年級においても、基本的に昼間は海底付近にて集群し、夜間に分散、浮上する日周鉛直移動が確認された。特に、本研究で主対象とする1, 2歳魚群については、6月の調査では、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魚群が多く観察された (Fig. 35, 36)。この結果は、海底デッドゾーンの影響による現存量の過小推定の危険性 (Aglen, 1994) を内包する音響資源調査にとっては好都合な特徴であるといえる。一方、魚群の年齢組成が高齢になるに伴い、昼間は海底に着底し、夜間もあまり浮上せず海底付近に留まる個体の割合が増加した (Fig. 36)。また、7～8月に掛けての盛夏に実施された調査 (Fig. 37) および12～1月の冬季に実施された調査では (Fig. 32)、年齢に関わらず日周鉛直移動の移動範囲が狭くかつ海底付近に限定され、昼間のエコーグラムでは魚群が海底に張り付くように分布し、夜間にわずかに離底あるいは中層まで浮上する様子が観察された。このような年齢および季節による日周鉛直移動パターンの変化は、年齢別現存量の推定結果にも反映していた。各調査における年齢別、昼夜別の現存量推定結果を示したFig. 46をみると、6月の調査では、1996年6月を除き、各年齢とも昼夜ほぼ同程度の現存量推定値が得られた。調査年によって若干の違いが見られるものの、3歳魚以上の年齢群では、夜間の調査結果に基づく現存量推定値が、昼間の調査結果に基づく現存量をわずかに上回る傾向が見られた。この理由としては、高齢魚では昼間着底していた個体が夜間海底から浮上し、海底デッドゾーンから抜け出すことにより夜間の現存量が増加したことが考えられる。一方、1, 2歳の若齢魚では、高齢魚とは逆に、昼間の調査結果に基づく現存量推定値が夜間の調査に基づく現存量を上回る傾向がみられた (2001年6月調査における1歳魚を除く)。特に、1996年6月の調査においては、昼間の調査結果に基づく現存量推定値が、夜間の調査結果に基づく現存量推定値の1.6倍に達し、調査を実施した時間帯により現存量推定結果に大きな差が生じた。前述したように、6月の調査時における若齢魚は昼間でも海底から離底して分布していたことから、海底デッドゾーンの影響による昼間の現存量推定値が過小推定の影響を免れた可能性は十分に考えられる。しかし、昼間の現存量推定値が夜間に得られる現存量推定値を上回るためには、更なる理由が必要となる。現段階で考える要因としては、スケトウダラ個体の TS_{AVG} の昼夜による変化および表層デッドゾーンの影響 (Aglen, 1994) の可能性が考えられる。大西洋タラ (*Gadus morhua*)

をケージ内で飼育し、そのTSの時間変化を測定した結果では、TSは昼間に大きく夜間に小さくなるパターンを繰り返し、昼夜によるTSの差は3～5 dBに達したという報告がある (MacLennan and Simmonds, 1992)。一方、北海道西部日本海に分布するスケトウダラ成魚および未成魚を対象に行われたスケトウダラ音響資源調査では、スケトウダラ魚群から抽出された *in situ* TSの分布には昼夜による変動は観察されなかった (安部ら, 1999)。ただし、海域や季節、対象とする個体サイズが異なることから、安部ら (1999) の結果がそのまま初夏の道東海域に分布する若齢魚にも当てはまるか否かについては不明である。現段階では、初夏の道東海域に分布するスケトウダラ若齢魚の TS_{AVG} の日周変化の可能性については、判断に用いることのできる情報が少なく、昼夜による現存量推定値の差異への影響を評価することは難しい。一方、表層デッドゾーンの影響については、1996年6月および2001年6月の調査時には、高豊度のスケトウダラ1歳魚群が、夜間表層付近まで浮上する様子が観察された (Fig. 35, 36)。これらの個体が表層デッドゾーンに入ることによって、夜間のデータに基づく現存量推定値が過小推定された可能性も考えられる。

Shida (2001) は、計量魚探機を用いて1996年および1997年5月の道東海域におけるスケトウダラ1, 2歳魚の日周鉛直移動を24時間連続観察した。その結果、春季の道東海域におけるスケトウダラ若齢魚群は、午後に海底直上に層状に集群、日没後に分散し魚群の一部が中層へ浮上した後、日出の2時間前から再び徐々に降下し始め、日出時には海底上で球形の魚群を形成するという複雑な日周鉛直移動を示した。この際、高い S_A が得られた時間帯は昼間の午後であり、日没直前に S_A が最高値に達し、逆に最も低い S_A が得られた時間帯は日出の直後で、日出から3時間後までの時間帯における S_A は夜間の S_A よりも低い値で推移した。一方、本研究におけるデータの収録においては、日出1時間後から日没1時間前までの間を昼間、日没1時間後から日出1時間前までの間を夜間と定義しており、昼間であれば午前中の航走も午後の航走も同じデータとして扱った。Shida (2001) が捉えた日周鉛直移動のリズムが、本研究における6月の調査時においても同様に繰り返されていると仮定した場合、本研究で採用した航走時間帯の設定では、 S_A が最大値および最小値を示した日没直前および日出直後の時間帯がいずれも含まれていない。さらに、昼間には午前中の比較的反応の少ない時間帯と、午後の比較的強い時間帯の双方が含まれ、また夜間においても日没後の比較的強い時間帯と、日出前の反応の低下する時間

帯の両方が含まれることになる。したがって、スケトウダラ若齢魚群の日周鉛直移動に伴う現存量推定値の日周変動が相殺され、均された形で表現されたとも考えられる。本研究において得られた年齢別現存量の推定結果は、1995年級が卓越年級であったことを加入前に検出するなど、若齢魚の年級豊度の多寡を捉えており、現在の調査時間帯設定においても、年級間の相対的な豊度は検出できていると考えられる。また、最も多くの魚群が計量魚探機の探知範囲に分布し、現存量が高く推定される時間帯のみを対象として定線航走を行う方法は、音響資源調査の実施条件としては極めて理想的ではある。しかし、限られた時間内で広範な調査海域を走査しなければならない調査の実情を鑑みると、定線航走に当てる時間帯を今以上に制限することは難しいと考えられる。今後、年齢別現存量推定値の絶対値としての評価が求められる場合には、スケトウダラ若齢魚の日周鉛直移動やTSの日周変動についての生態的な知見を積み重ねた上で、対象魚群の行動生態を考慮した形でより適切な調査時間帯の設定が必要になると考えられる。

7～8月および12～1月の調査で得られる年齢別の現存量推定値では、1998年7月および1999年1月の調査を除き、基本的に全ての年齢群において夜間の収録データに基づく現存量推定値が昼間のデータに基づく現存量推定値を上回った。この理由としては、夜間海底から離底・浮上することによって計量魚探機に捉えられていた個体が、昼間海底に沈降・着底することにより海底デッドゾーン内に含まれることにより (Fig. 32, 37), 昼間に収録したデータにおいて現存量推定値に過小推定が生じたためと考えられた。2001年1月、2001年7月および2002年1月の調査では、高豊度の2000年級の評価において、昼夜による現存量推定値の差が著しく拡大した (Fig. 46)。特に、2001年1月の調査における0歳魚 (2000年級) の現存量推定では、夜間のデータに基づく現存量推定では近年の年級の中でも非常に高い値を示したのに対して、昼間のデータに基づく現存量推定では極めて低い値に留まり、昼夜間で2000年級の年級豊度評価が全く異なる結果となった。同様の日周鉛直移動パターンおよび現存量推定値の昼夜による変動は、Shida (2001) が1996年および1997年の11月に道東海域に分布するスケトウダラ若齢魚群において観察した結果と一致した。また、濱津ら (2001) は、2000年9月の昼間に水深144～330mの道東陸棚域および上部陸棚斜面域において潜水艇によるスケトウダラ魚群の目視観測を行い、昼間の底層におけるスケトウダラ魚群が海底から3mの範囲で留まり遊泳する様子を観察した。これらの結果は、いずれも盛

夏から冬季にかけての道東海域に分布するスケトウダラを対象とした現存量推定において、昼間は多くの個体が海底デッドゾーン内に留まり、現存量が過小推定される恐れが強いことを示唆した。以上のことから、盛夏から冬季にかけての道東海域においてスケトウダラを対象とした音響資源調査を行う場合には、夜間にデータを収録する方がより高い現存量推定値が得られると判断された。

冬季の道東海域における推定現存量の減少とその要因

調査時期によっても現存量推定値は大きく変化した。同一年級の現存量推定値の推移を調査の順に追うと (Fig. 47), 多くの年級において、初夏の調査では高い値を示した現存量推定値が、約半年後の冬季調査では大きく減少し、更にその半年後の初夏の調査で再び大幅に増加し、季節に応じて上下動を繰り返すパターンを示した。初夏の調査に比べて冬季の調査における現存量推定値が減少する要因としては、三つの理由が考えられた。一つは、冬期間の道東海域における現存量そのものの減少の可能性が考えられる。初夏の道東海域に分布した魚の一部が冬期間に調査海域の外に移出し、その後翌6月までの間にそれらの魚が再び道東海域へ移入するような移動・回遊パターンが存在するならば、道東海域における現存量推定値は季節に応じて上下動することになる。このような移動は、成熟に達した成魚については十分に考えられる。スケトウダラ太平洋系群においては、多くの個体が4歳の冬に成熟を迎えるとともに、それまで索餌域として利用してきた道東海域から、産卵場が形成される噴火湾湾口部に向けて移動することが知られている (吉田, 1979; 濱津, 八吹, 1995)。しかし、若齢魚については冬期間の移動・回遊に関する知見はあまり得られていない。1997年12月および1998年1月に連続して実施した調査では (Fig. 41), 約1カ月の間にスケトウダラ2歳魚 (1995年級) の分布域が沖合側へ移動する様子が観察されたが、道東海域の外への若齢魚の移動の有無については、調査海域が限られていたこともあり評価できなかった。両調査を含め毎年12～1月に実施した音響資源調査では、若齢魚群は釧路より西側、特に襟裳岬周辺海域に偏って分布した (Fig. 21, 22, 24, 26)。さらに、日高湾まで調査海域を拡大した後に実施された2001年および2002年1月の調査では、襟裳岬東岸から襟裳岬西側の陸棚域にかけて0歳魚および1歳魚群が連続的に分布した (Fig. 28, 31)。これらの結果から、冬季の北海道太平洋岸におけるスケトウダラ若齢魚群の分布域は、釧路以西の道東陸棚域から襟裳岬周辺および日高湾沿岸部までの広範囲にわたる一方で、道東

海域だけを対象とした従来の冬季調査では若齢魚の分布域の全てを網羅した調査ではなかったために、その現存量が過小推定となった可能性も考えられた。しかし、調査海域を日高湾まで拡大した後に捉えられた2000年級の現存量推定では、日高湾沿岸に分布する0歳魚の現存量推定値（夜間）は6,600万尾で（Table 6）、道東海域における夜間の現存量推定値：4億3,660万尾と合計しても5億260万尾と、同年6月の調査時における道東での現存量推定値：13億2,660万尾（Table 5）を大きく下回った。一方、道東海域より東側の北方四島の太平洋岸への移出の可能性については、冬季の北方四島海域における調査・観測データが存在しないため、直接的な判断は難しい。しかし、道東海域内においても若齢魚の分布はより西側の襟裳岬周辺海域に集中し（Fig. 21, 22, 24, 26, 28, 31）、釧路以東の海域において若齢魚の分布が見られることがまれであった。これらのことを考慮すると、より水温が低く、若齢魚の生息環境としては厳しいと想像される北方四島海域へ冬期間大量の若齢魚群が移動することは考えにくい。このように、スケトウダラ若齢魚の現存量推定値が冬季調査において減少する理由を、調査海域の範囲の違いあるいは若齢魚群の道東海域からの移出で全て説明することは、本研究からは困難である。

冬季調査における現存量推定値が6月の調査における現存量推定値を大きく下回る二つ目の要因としては、前述の昼夜による現存量の変動と同様、海底デッドゾーンによる過小推定が考えられる。冬季調査で観察されたスケトウダラ魚群は、昼間は海底に張り付くように分布し、夜間わずかに離底あるいは中層へ浮上する日周鉛直移動を示した（Fig. 32）。また、夜間における魚群の上昇においても、6月の調査のように表・中層域まで魚群が浮上することは少なく、海底付近に留まる個体が多く観察された（Fig. 32）。このような日周鉛直移動のパターンから、冬季調査時におけるスケトウダラ魚群の分布は、6月調査時における魚群分布に比べ、海底デッドゾンの影響を強く受けやすい条件にあった。それが現存量推定結果の過小推定として現れ、冬季調査における現存量推定値の減少につながった可能性が考えられる。三つ目の要因としては、冬期間荒天下で音響資源調査を実施することによる、航走減衰による過小推定の可能性が考えられる。1.2.3節では、本研究に用いた調査船における航走減衰の特徴について考察し、周波数38kHzにおいては、風波を船首側から受ける航走の場合、船速7.8～8.8ノット付近で1.3dB程度の減衰が起ることを明らかにした。この結果に基づき、同じ気象条件下における航走速度や風波に対する方向の影響は予測することが可能である。

しかし、異なる気象条件下においてどの程度の航走減衰が発生するかについては、現状では予測は困難である。Fig. 47に示したように、1月と6月の調査における現存量推定値の差はおおよそ2倍前後と考えられる。仮に1月の調査において、荒天により6月の調査に比べ3dB程度の航走減衰が発生すれば、現存量推定値は実際の1/2まで減少し、Fig. 47に示した程度の差を再現できてしまう。二つ目の要因として挙げた海底デッドゾーンの問題についても同じことが言えるが、同じ季節に実施された調査間で結果を比較する際には、測定時の環境は同じでありそれほど問題にはならないと思われる。しかし、異なる季節の調査によって得られた現存量推定値を比較する場合には、現時点では季節および気象条件による航走減衰や生物側の条件の違いが現存量推定に与える影響について正確な評価ができないことに十分留意する必要がある。

夏季の道東海域におけるスケトウダラ魚群の分布位置の移動と現存量推定値の変化

1996年6月および8月に道東海域において実施した音響資源調査の結果、6月に陸棚上に広く分布していたスケトウダラ1歳魚（1995年級、卓越年級）の魚群は、8月には襟裳岬東部沖合域においてまとまった魚群が観察されたのみで（Fig. 38）、推定された現存量推定値も、28億尾（昼間）から0.9億尾（夜間）へと、6月調査時の2割強まで減少した（Table 5）。2001年6月および7月に道東陸棚海域で実施した音響資源調査では、約1ヵ月の間に、全ての年齢群の分布域が陸棚の沖合側あるいは上部斜面域へ移動し（Fig. 39, 40）、かつ昼間の着底傾向が強まる様子が確認された（Fig. 36, 37）。魚群の沖合への移動を誘引する要因は明らかではないが、1ヵ月の間に陸棚上の水温が全体に2～4度程度上昇しており（Fig. 36, 37）、水温の上昇に伴い、より水温の低い沖合域へ移動した可能性も考えられる。また、1歳魚（2000年級）の現存量推定値は、昼間のデータに基づく結果では、6月の13億2,660万尾から7月の6億440万尾へと大幅に減少したのに対して、夜間のデータに基づく結果では、6月が14億1,040万尾、7月が16億4,160万尾とほぼ同じ値を示し、1996年の6月および8月の調査結果とは異なる傾向を示した（Table 5, 6, Fig. 46）。1996年、2001年の両年において、特に昼間の調査データに基づく現存量推定値が季節の進行とともに減少した背景には、前述のように昼間魚群が海底に着底する割合が上昇することにより、海底デッドゾーン内に分布する個体の割合が増加し、計量魚探機で捉えられる現存量が減少したことが考えられる。2001年6月および7月に実施し

た調査において、昼間の調査データに基づく現存量推定では両調査の間で大きな違いが見られたのに対して、夜間のデータに基づく現存量推定値はほぼ同じ値を示していた。このことは、7月下旬の調査においても、魚群が海底から離底しやすい夜間のデータを使うことにより、海底デッドゾーンの影響による過小推定を免れる可能性を示唆する結果と考えることができる。一方、1996年6月と8月の調査において得られた夜間の調査結果に基づく現存量推定値は、それぞれ17億4千万尾と9億2千万尾で (Table 5)、夜間の調査結果を用いても、両者間には大きな差が見られた。1996年8月の調査の場合は、昼夜いずれのデータに基づいても、魚群反応の分布範囲および分布量の双方ともに同年6月の時点に比べて大きく減少しており (Fig. 17, 38)、昼夜を問わず、計量魚探機で魚群反応を捉えることができない状態にあったことが予想される。考えられる原因の一つは、1996年6月と同様に魚群は調査海域内に分布していたものの、昼夜ともに海底デッドゾーン内にほとんどの個体が分布し、海底から浮上せず、過小推定となった可能性がある。もう一つの原因としては、6～8月の間に若齢魚群が道東海域から逸散した可能性が挙げられる。魚群の逸散の可能性については、1996年6月の時点では道東陸棚域のほぼ全域で分布が確認されたスケトウダラ1歳魚 (1995年級) が、同年8月には襟裳岬東岸でまとまった魚群の分布が確認されたのみで、他の地点は魚群の分布が殆ど観測されなかったことから想像されるが (Fig. 38)、大量に分布していた1歳魚群がどこへ移動したのかについての情報は得られていない。本研究で得られたデータのみでは、盛夏におけるスケトウダラ若齢魚の現存量の減少が海底への着底による過小推定のみから生じているのか、さらに調査海域からの逸散も起こっているのかを判断することは困難である。しかし、道東海域に分布するスケトウダラ若齢魚群を対象として音響資源調査を実施する場合には、現存量推定値の減少が起こりうる盛夏よりも、6～7月の初夏に実施するほうが、問題が少ないと判断された。

混在する生物がスケトウダラの現存量推定に及ぼす影響

スケトウダラ魚群と混じって分布する魚種の存在は、音響資源調査における魚種判別を難しくする要因の一つとなる。オキアミや動物プランクトンは、夜間に表層付近に分散して分布し、中層から表層域まで浮上したスケトウダラと混在するケースも見られた。しかし、動物プランクトンの場合、38kHzなどの比較的低い周波数では、サイズと音波長の比である L/λ が小さく、

TSが大きく減少する (古澤, 1990; 古澤, 1994)。本研究において捉えられた動物プランクトンの反応も、38kHzでは魚類の散乱強度に比べて極めて小さく (Fig. 42)、スケトウダラの魚群反応に混在した状態で積分されても、よほど濃密なプランクトンが大量かつ広域に分布しない限りは、スケトウダラの現存量推定に与える誤差 (過大推定) は大きくないものと考えられた。

それに対して、スケトウダラ以外の魚種の魚群反応の混在あるいはスケトウダラ魚群との誤認は、スケトウダラの分布および現存量推定の上で大きな誤差要因となりうるため、魚種確認およびデータ解析にあたっては、十分な注意が必要であることが示唆された。1996年8月および1997年12月の道東海域における調査では、カタクチイワシの分布が確認された。カタクチイワシは、昼間は独特の形状の魚群を形成することが多く (Fig. 43上, 中図)、エコーグラム上の魚群形状から魚種を判断することも比較的容易であったが、時折海底直上に層状に分布する魚群などは (Fig. 43下図)、スケトウダラ魚群と誤認しかねない。さらに、夜間は表層付近で分散する傾向があり、やはり表層付近まで浮上して分散するスケトウダラ若齢魚群と同様の分布パターンを示した。本調査では夜間の漁獲試験を行っていないため、夜間の航走時に得られた魚群反応の魚種の判断は、昼間に実施したトロール曳網の結果にしたがって判断せざるを得なかった。しかし、昼間にカタクチイワシとスケトウダラの両種が分布する様な条件下では、夜間に表層域で分散して分布する魚群の魚種を判別・分離することは非常に困難である。そのため、カタクチイワシの魚群反応をスケトウダラと間違えて積分したり、あるいはその逆など、スケトウダラ若齢魚群の現存量推定における誤差要因の一つと考えられる。6月の調査時には、カタクチイワシの北海道太平洋岸への来遊量はまだそれほど多くなく、また1月の調査では12月よりも水温が低下することもあり、カタクチイワシの分布は確認されなかった。このことから、カタクチイワシが北海道太平洋岸へ来遊する夏から晩秋にかけての時期を外して調査を行い、魚種の誤認による現存量推定の誤差の増加を防ぐことを検討する必要がある。

イトヒキダラの魚群分布については、スケトウダラ魚群よりも深い側に分布し、またエコーグラム上でもスケトウダラ魚群との分布の境界が明らかな場合が多く (Fig. 45)、スケトウダラ魚群との区別は比較的容易であった。しかしながら、スケトウダラの分布域との境界深度は時期および海域によって大きく異なることがあり、水深200m付近まで分布域が上昇したイトヒ

キダラ魚群などがあると、しばしばスケトウダラ魚群と誤認され、漁獲試験によって訂正を行うこともあった。以上のことから、エコーグラム上で魚群反応が分布する深度帯からイトヒキダラ魚群であろうと推定した魚群についても、状況に応じて漁獲試験を行い、魚種判別の精度確認が必要と思われる。

第3章 魚群の分布位置情報に基づく年齢組成・年齢別体長組成の推定および魚群反応の年齢分解

第2章で示した通り、通常スケトウダラの魚群反応には複数の年齢群が含まれる。音響資源調査ではこれらは全て一つの音響散乱量として収録されるが、年齢別の現存量を推定する際には、それぞれの魚群反応ごとに、漁獲試験によって得られた年齢組成 p_i と年齢別に求めた $\overline{\sigma_{bs}}$ に基づき、(2.2) 式より各魚群反応の s_a を各年齢に分解し、年齢別現存量に換算した。この際、原則として各魚群反応と漁獲試験の結果は1対1で対応づけることから、できる限り多くの魚群反応に対して魚種確認のための漁獲試験を行う必要がある。しかし、トロール操業は時間と労力の掛かる作業であるため、計量魚探機で捉えた全ての魚群反応に対して漁獲試験を行うことは事実上不可能であり、実際には、いくつかの代表的な魚群反応に対してのみ漁獲試験を行う場合が多い。その結果、漁獲試験によって得られたスケトウダラの年齢組成および年齢別尾叉長組成の情報は、標本が得られた魚群反応のみならず、その周囲に分布する魚群の解釈に際しても、同様の年齢組成・年齢別尾叉長組成を持つものとして当てはめられることになる。しかし、漁獲試験が行われた魚群から遠く離れた魚群反応については、どの程度の年齢組成および年齢別尾叉長組成における類似性があるか不明であり、離れた魚群反応で得られた漁獲試験の結果をそのまま当てはめて良いかどうかは疑わしくなる。

もし、対象海域におけるスケトウダラの分布パターン、特に年齢組成および年齢別体長組成とその魚群の分布位置との間に何らかの関係が見いだせるならば、魚群反応の分布位置からその魚群におけるスケトウダラの年齢組成 p_i およびその年齢別平均後方散乱断面積 $\overline{\sigma_{bs}}$ を推定することで、魚種確認のためのトロール操業の数を減らし、また膨大な年齢査定作業を簡略化できると考えられる。

本章では、水深や東西方向などの魚群分布位置情報とスケトウダラの年齢組成および年齢別平均尾叉長との関係について検討し、その結果に基づいて魚群反応を各年齢群に分解する方法の開発を試みた。

方 法

調査の概要

本研究では、第2章で用いた調査結果のうち、1999年6月に道東海域において漁業調査船第三開洋丸（日本海洋株式会社所属）にて収録したデータおよび漁獲試験の結果を解析に用いた。調査の概要については、第2章で述べた通りである。第2章で用いた魚群反応の年齢分解法を用いて求めたスケトウダラの年齢別分布パターンをFig. 48に示した。

スケトウダラ魚群の年齢組成および年齢別尾叉長組成に影響を与える要因の検出

多変量解析の手法を用いて、スケトウダラ魚群の年齢組成及び年齢別尾叉長組成と相関を持つ要因の抽出を行った。

1) 魚群分布位置による年齢別尾叉長組成および年齢別 $\overline{\sigma_{bs}}$ の推定

(2.1) 式を用いて $\overline{\sigma_{bs}}$ を推定するためには、2つの生物パラメータ: 平均尾叉長 $\overline{FL}$ と分散 σ_{FL} が必要である。そこで、まず年齢別尾叉長組成と魚群分布位置との関連について検討した。

1回の曳網において漁獲される同一年齢の個体 n_i を、同じ年齢群からの繰り返し抽出による標本とみなし、繰り返しのあるデータへの回帰分析を適用した。漁獲試験で得られた標本毎に、年齢 i における平均尾叉長 $\bar{y}_i$ を、各標本中の年齢 i の集団における個体の尾叉長データ y_{ij} ($j=1, \dots, n_i$) から計算した。ここで、 j は年齢 i の集団における各個体の番号を示す。この過程で、1個体しか漁獲されなかった年齢群については、年齢別尾叉長組成の分散が計算できないため、以後の計算から除いた。分布位置情報を説明変数に、また漁獲試験毎の $\bar{y}_i$ を目的変数とし、回帰式を当てはめた。魚群分布位置の情報としては量的変数である分布水深: x と、質的変数として分布海域あるいは中層曳網か着底曳網かの違い: c を説明変数として想定した。ある水深 x_0 と海域区分 c_1, c_2 および曳網形態 c_3 における $\bar{y}_i$ の期待値: $\hat{\eta}_0$ は、変数 x_0 と c により以下の式で表される:

$$\hat{\eta}_0 = b_0 + b_1 x_0 + c_1 + c_2 + c_3 \quad (3.1)$$

その後、逐次選択法により変数の選択を行った。同時に、 $\hat{\eta}_0$ の標準誤差を以下の式により求めた:

$$s(\hat{\eta}_0) = \sqrt{\frac{1}{m} \cdot s_e^2 + (x_0 - \bar{x})^2 \cdot s(b_1)^2} \quad (3.2)$$

ここで

m: 回帰分析に用いた $\bar{y}_i$ の数

s_e : $\hat{\eta}_0$ と $\bar{y}_i$ の残差

$\bar{x}$: 回帰分析に用いた量的変数 x の平均値

$s(b_1)$: 回帰係数 b_1 の標準誤差。

平均尾叉長の期待値 $\hat{\eta}_0$ まわりの個々の尾叉長データ y_{ij} のバラつき $s(\hat{y}_0)$ は、漁獲標本毎に得られる $\bar{y}_i$ からの y_{ij} の偏差 $s(y_{ij})$ を $s(\hat{\eta}_0)$ に加えることで示される:

$$s(\hat{y}_0) = \sqrt{s(\hat{\eta}_0)^2 + s(y_{ij})^2} \\ = \sqrt{\frac{1}{m} \cdot s_e^2 + (x_0 - \bar{x})^2 \cdot s(b_1)^2 + s(y_{ij})^2} \quad (3.3)$$

ここで

$$s(y_{ij}) = \sqrt{\frac{\sum_i \left(\sum_j (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \right)}{\sum_i n_i - 1}} \quad (3.4)$$

最後に、 $\hat{\eta}_0$ と $s(\hat{y}_0)$ およびスケトウダラにおける基準化 TS: $TS_{cm} = -66.0\text{dB}$ (Foote and Traynor, 1988) を線形変換した後 (2.1) 式に代入し σ_{bs} を求めた。

2) 魚群分布位置情報に基づく年齢組成比の推定

年齢組成比は 0 から 1 の間の値を取る変数である。第 2 章で示した通り、北海道太平洋海域に分布するスケトウダラでは、分布深度が増すにつれてその年齢組成が若い年齢群主体から高齢群主体へと変化する傾向が見られた。そこで、年齢組成の変化に対する独立変数として水深をとり、ロジスティック回帰を行った。

まず、漁獲標本ごとに年齢が k 歳以上のスケトウダラ個体がスケトウダラ全体の尾数 n に占める割合 $p_{k\leq}$ を計算した。次に、 $p_{k\leq}$ を対数変換して経験ロジット $z_{k\leq}^*$ を求め、水深に対してプロットした:

$$z_{k\leq}^* = \ln\left(\frac{p_{k\leq}^*}{1 - p_{k\leq}^*}\right) = \ln\left(\frac{r_{k\leq} + 0.5}{n - r_{k\leq} + 0.5}\right) \quad (3.5)$$

重みづけ回帰直線を経験ロジットの散布図に当てはめ、それを逆ロジット変換して得たロジスティック曲線:

$$p_{k\leq}^* = \frac{1}{1 + e^{-z_{k\leq}^*}} \quad (3.6)$$

が、年齢 k 以上の個体の組成比を示すロジスティック曲線となる。なお、経験ロジットの散布図への重みづけ回帰直線の当てはめには、統計ソフトウェアパッケージ “StatView” を用いた。

最後に、年齢 $k-1$ における年齢組成比 p_{k-1}^* を、得られたロジスティック曲線間の減算: $p_{k-1}^* - p_{k\leq}^*$ によって求めた。また 1 歳魚の年齢組成比は $1 - p_{2\leq}$ によって求めた。

複合正規分布による年齢別尾叉長組成の再現

年齢別尾叉長組成を正規分布で近似する場合、正規分布を規定する 2 つのパラメタである平均値 μ と標準偏差 σ に、年齢群毎の平均尾叉長 $\hat{\eta}_0$ とその標準偏差 $s(\hat{\eta}_0)$ をそれぞれ代入する:

$$f(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(l - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.7)$$

ここで、 l はある体長を示す。

よって、複数の年齢群からなる集団の尾叉長組成は、年齢群ごとに得られた尾叉長組成に、年齢組成比を掛けたうえで積み重ねた複合正規分布として表される:

$$\sum_k (p_k^* \cdot \int f(l_k)) \quad (3.8)$$

ここで、 $\int f(l_k)$ は年齢 k におけるある体長階級内の頻度を算出するための積分を示す。

これら一連の計算過程は、複数の年齢群からなる体長組成を複合正規分布とみなし、それを個々の正規分布に分解する方法 (田中, 1956; Hasselblad, 1966) の逆を辿るのと同じことになる。

複数の年齢群からなる尾叉長組成の再現性を評価するため、トロール漁獲の行われた地点における位置情報を用いて複合正規分布による尾叉長組成を再現し、実際の操業で得られた年齢別尾叉長組成と比較した。

さらに、位置情報に基づく複合正規分布による尾叉長組成を用いて、調査で得られた魚群反応を各年齢群に振り分け、従来の年齢分解法による年齢別現存量推定結果と比較した。

結 果

予備的解析

全 33 回実施した試験操業のうち、31 回の操業においてスケトウダラの漁獲尾数が増えた種に優占した (Fig. 48)。そのうち、スケトウダラが 50 尾以上漁獲された 23 回の操業における年齢別尾叉長組成を、Fig. 49 に積み重ね棒グラフの形で示した。縦に二つ並べて表示したグラフのうち、上側が実際の試験操業結果から得られた年齢別尾叉長組成を示す。グラフの配置は、図中の上下が調査海域内における東西方向に、図中の左右が浅深方向に対応するよう配置した。各年齢群における尾叉長組成と分布水深との関係を Fig. 50 左列に示した。

従来の年齢分解法によって得られた年齢別の水平分布パターン (Fig. 48), および Fig. 49 に示した漁獲試験毎の年齢別尾叉長組成から, 以下のことが示唆された:

- 1) 魚群の分布する位置によって, スケトウダラの年齢組成に特徴が見られた (Fig. 48)。釧路以東海域では 1 歳魚および 4 歳魚, 釧路以西の定線 J ~ M 付近の海域では 2 歳魚および 3 歳魚が他の年齢群よりも多く分布する傾向が見られた。また襟裳岬周辺海域では, 釧路以西海域とも異なり, 1 歳魚および 2 歳魚の分布が多く見られた。
- 2) 小型で若齢の個体ほど浅い側に分布し, 大型で高齢の個体ほど深い側に分布する傾向が見られた (Fig. 48, 49)。

これらの結果から, スケトウダラの分布, 特に年齢組成及び年齢別尾叉長組成に影響を与えうる魚群分布位置情報として, 水深と海域の 2 つを説明変数として採用した。海域については, 年齢組成に特徴が見られた釧路以東海域, 釧路以西海域及び襟裳周辺海域の 3 海域に調査水域を区分して扱った (Fig. 48)。

回帰分析

1) 年齢別平均尾叉長と環境要因との関係

3 つの異なる説明変数: 水深 x_0 , 3 つに区分した海域の違いを表現する c_1 , c_2 および曳網方法の違いを表す c_3 と, 年齢別平均尾叉長 $\bar{y}_i$ との間の回帰関係を逐次選択法によって求め, Table 7 に回帰式を, また Fig. 50 中列に回帰直線と平均尾叉長 $\bar{y}_i$ の標準偏差 (SD) の範囲を示した。回帰分析の結果, 道東海域におけるスケトウダラの分布位置と魚群の年齢組成および年齢別尾叉長組成の間で, 以下に示す関係が示された:

- 平均尾叉長: $\bar{y}_i$ と水深: x_0 , 海域特性: c_1 および c_2 との関係は回帰直線式によって表現された (Table 7)。
- 1 歳魚 (釧路以西海域を除く), 3 歳魚および 4 歳魚における平均尾叉長: $\bar{y}_i$ は, 分布水深の増加に伴い有意に増加した (Table 7; Fig. 50 中列)。
- 分布海域区分による尾叉長組成の違いは, 3 歳魚, 4 歳魚および 5 歳魚において有意であった (Table 7)。3 歳魚では, 回帰直線の傾きは 3 海域とも同じであったものの, 切片の値が海域区分により有意に異なった。すなわち, いずれの水深においても, 釧路以西海域における 3 歳魚の平均尾叉長 $\bar{y}_3$ は 28.3mm, また襟裳周辺海域における 3 歳魚の平均尾叉長 $\bar{y}_3$ は 32.5mm ほど, 釧路以東海域における 3 歳魚の平均尾叉長 $\bar{y}_3$ よりも小さかった。4 歳魚では, 釧路以東海域における回帰直線の傾きは, 他の 2 海域における回帰直線の傾きよりも有意に大きかった。5 歳魚

以上では, 分布水深による平均尾叉長 $\bar{y}_{5+}$ の変化は有意ではなく, 海域による違いのみが有意となった。すなわち, 襟裳以東における $\bar{y}_{5+}$ は, それ以外の海域における $\bar{y}_{5+}$ よりも 31.8mm 大きかった。

- トロール曳網方法の違い (中層曳網か着底曳網か) を表す c_3 は, いずれの海域区分および年齢群における尾叉長組成においても有意な関係は見いだされなかった。
- 襟裳以西海域に分布する 1 歳魚および 2 歳魚では, 平均尾叉長 $\bar{y}_i$ といずれの説明変数との間においても有意な関係が見られなかった (Table 7, Fig. 50 中列)。
- 平均尾叉長の標準偏差 $s(\hat{y}_0)$ の, 水深 x_0 の増加に対する変化はごくわずかであった (Table 7, Fig. 50 中列)。

2) 魚群の年齢組成比と魚群分布位置との関係

第 2 章および予備的解析の結果, 分布水深の増加に伴いスケトウダラ魚群における年齢組成比が若齢魚主体から高齢魚主体へ変化する傾向が示された。そこで, 年齢別尾叉長組成と同様に釧路以東, 釧路以西および襟裳周辺海域の 3 海域におけるスケトウダラ魚群内の年齢組成比と分布水深との間の関係について検討した。その結果, 経験ロジット $z_{k\leq}$ への回帰直線の当てはめでは, いずれの水深, 年齢群においても有意な関係が得られた (Table 7)。得られた回帰直線を逆ロジット変換し, 水深に応じて変化する年齢組成比を表すロジスティック曲線を得た (Fig. 50 右列)。その後, 各海域における年齢別のロジスティック曲線を重ね合わせ, 分布水深に応じた年齢組成比を示した (Fig. 51)。

年齢別 $\overline{\sigma}_{bs}$ と複数年齢群の尾叉長組成の再現

分布水深と海域区分を用いて, 年齢別尾叉長組成と年齢組成比の両方を推定することができた。そこで, その結果がどの程度現実の魚群分布を反映しているかを評価するため, 実際の漁獲試験の結果と比較した (Fig. 49)。漁獲試験が行われた位置の水深及び海域区分を用いて, その位置に分布する魚群の年齢別平均尾叉長 $\hat{\eta}_0$ とその標準偏差 $s(\hat{y}_0)$, それらの値を (2.1) 式に代入して求められる $\overline{\sigma}_{bs}$ の常用対数を取り dB 表示した TS_{AVG} , および年齢組成比 p_{k-1}^* を回帰式から推定し, Fig. 49 の表に示した。これらの推定値を (3.8) 式に代入し, 年齢毎の体長組成を複合正規分布の形で表現し, 実際の漁獲物中の年齢別尾叉長組成と比較した (Fig. 49)。

トロールによる漁獲標本から得られた年齢別 TS_{AVG} と, 回帰関係を用いて推定した TS_{AVG} を比較した結果, 両者

間における TS_{AVG} の差は最大でも 1.4dB (Fig. 49 MT-07, 5 歳以上) に留まり、多くのケースでは TS_{AVG} の差は 1 dB 未満に収まった。この結果から、魚群分布位置情報を用いて推定した年齢別 TS_{AVG} は、実際に漁獲試験で得られた標本から求められる TS_{AVG} を良く再現していた。

複数年齢群の尾叉長組成の再現においては、2 歳魚以上の年齢群についてはほぼ実測値に似た年齢組成および年齢別尾叉長組成を再現することができた (Fig. 49)。それに対して、特に浅海域における 1 歳魚の分布については、尾叉長組成はほぼ実際と同じ範囲で再現できたものの、実際の操業では 1 歳魚が漁獲されなかった場所で 1 歳魚の分布が再現されたり (Fig. 49, MT-12)、逆に実際には 1 歳魚が漁獲されているにも関わらず、わずかな量の 1 歳魚の分布しか再現されな

いなど (Fig. 49, MTT-02 および MT-16)、年齢組成の再現性におけるばらつきが大きいことが示された。

魚群分布位置情報に基づくスケトウダラ魚群反応の年齢分解

魚群分布位置情報との回帰式から得られた年齢別の σ_{bs} および年齢組成比 p_{k-1}^* を (2.2) 式に代入し、 s_a の年齢分解を行った。 s_a の年齢割り当ての係数となる単位面積あたりの年齢 i の尾数: D_i を海域ごと、水深 10m 毎に計算し、スケトウダラ魚群反応の s_a の年齢振り分けに用いた。この方法による年齢別の現存量推定結果と、従来の年齢分解法に基づく年齢別現存量推定結果を Table 8 に示した。また、適用した方法の違いによる年齢分解結果の違いを表現するため、調査定線における魚群反応の年齢分解結果の違いを、海域ごとに 1

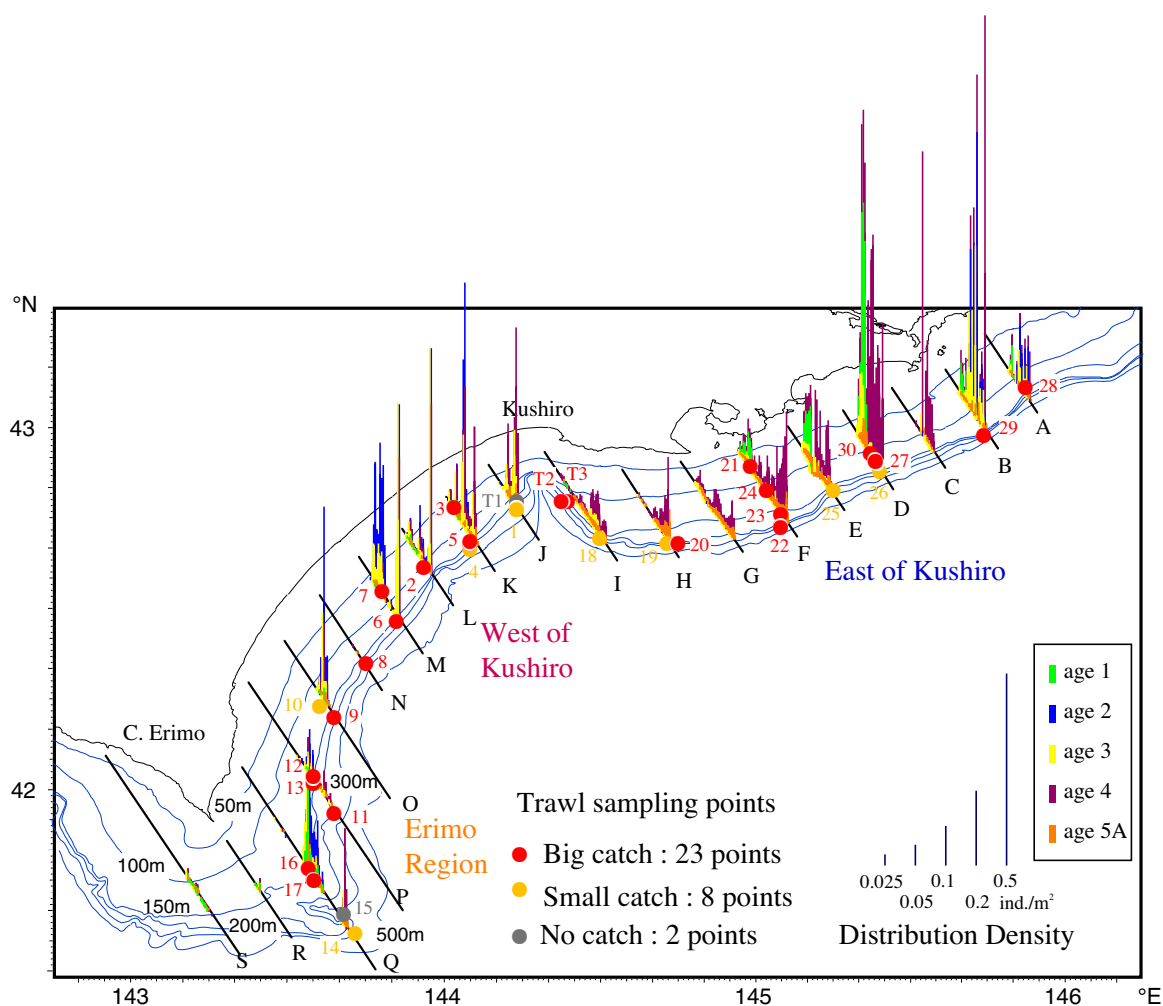


Fig. 48. Transects, trawl sampling points and the distribution pattern of walleye pollock at age interpreted by the conventional method of age decomposition

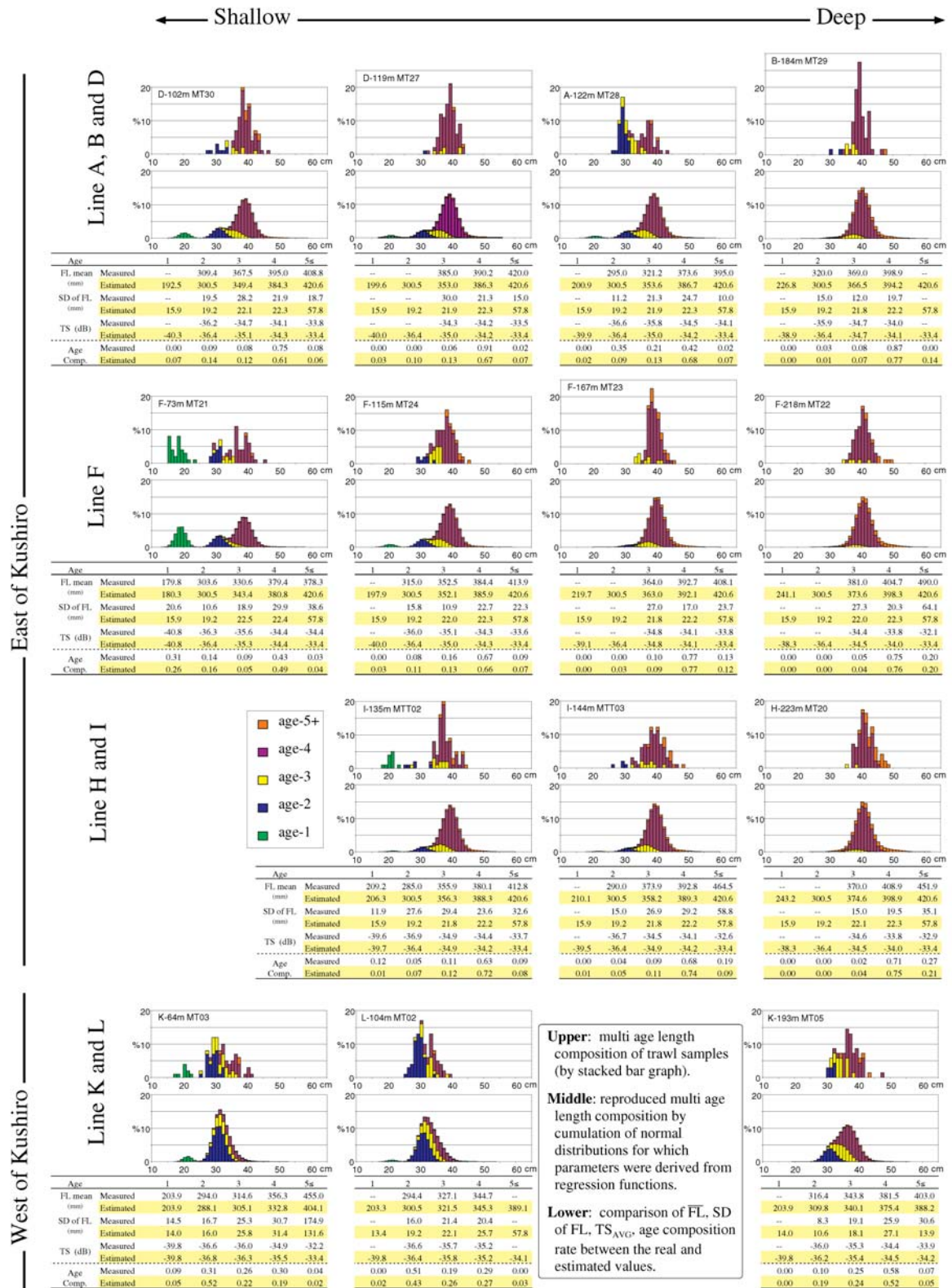


Fig. 49a. Comparison of TS_{AVG}, age composition rate and the multi age length compositions of walleye pollock (1)

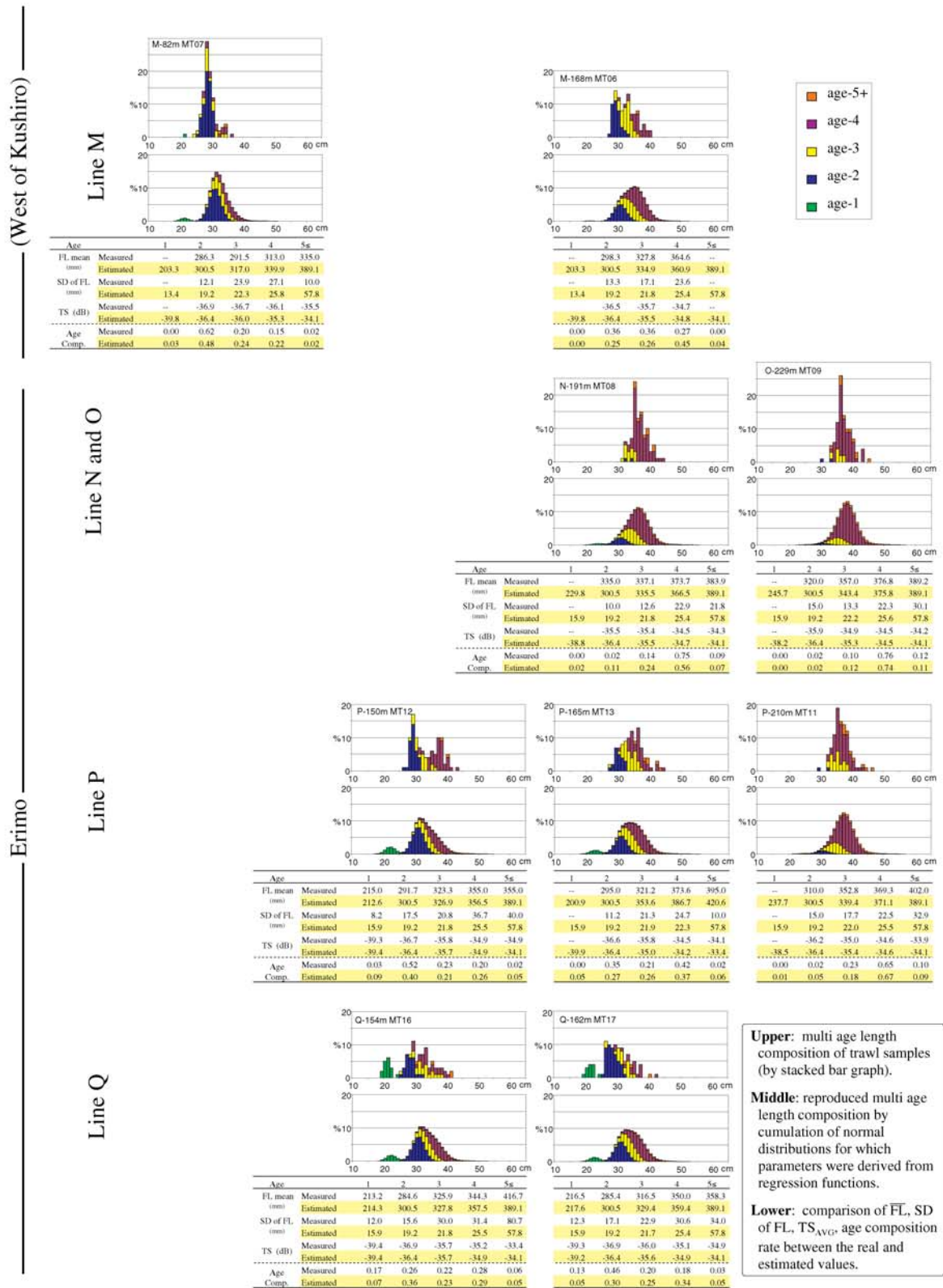


Fig. 49b. Comparison of TS_{avg} , age composition rate and the multi age length compositions of walleye pollock (2)

定線ずつ代表例としてFig. 52 に積み上げ棒グラフの形で示した（釧路以東: Line D, 釧路以西: Line M, 襟裳周辺: Line Q）。

従来の年齢分解法と、魚群分布位置情報を用いた年齢分解法によって推定された年齢別現存量の差は、2～4歳魚では20%以内の差に収まった（Table 8D）。一方、1歳魚および5歳魚以上については、両年齢分解法の間で40%あるいはそれ以上の差が生じた（Table 8D）。これらの現象は、各調査定線上の魚群反応を各年齢に配分する際にも確認された。定線Dにおいては、浅海域における魚群反応の1歳魚への割り付け比率が、両方法間で大きく異なることが示された（Fig. 52a）。

考 察

魚群分布位置情報に基づく年齢別平均TSの再現性

魚群の分布位置情報を用いて推定した平均尾叉長の期待値: $\hat{\eta}_0$ と、そのまわりの尾叉長データのバラつき: $s(\hat{y}_0)$ の両パラメータを (2.1) 式に代入して求めた年齢別平均後方散乱断面積: $\overline{\sigma}_{bs}$ (比較にあたって常用対数をとってTS_{AVG}で表示) は、漁獲試験で得られた標本から計算した年齢別の TS_{AVG} と近い値を示した (Fig. 49)。この結果は、以下の理由によると考えられた。

- 多くの地点において、平均尾叉長の期待値: $\hat{\eta}_0$ と魚群分布位置情報（水深、海域区分）との関係を有意な回帰関係として示すことができた。
- 年齢別平均後方散乱断面積: $\overline{\sigma}_{bs}$ を計算する (2.1) 式には、平均尾叉長の期待値: $\hat{\eta}_0$ とそのまわりの尾叉長データのバラつき: $s(\hat{y}_0)$ の2つの項が含まれるものの、 $s(\hat{y}_0)$ の位置情報による変動は小さく、さらに (2.1) 式における $\hat{\eta}_0^2$ の効果が $s(\hat{y}_0)^2$ に比べて極めて大きいために、 $\overline{\sigma}_{bs}$ の殆どが $\hat{\eta}_0$ のみで決定された (Table 7)。
- $\hat{\eta}_0$ の期待値が真値から多少ずれても、 $\overline{\sigma}_{bs}$ の変動がわずかであった。例えば、尾叉長30cmのスケトウダラ2歳魚において、平均尾叉長の標準偏差に相当する2cm分誤って平均尾叉長の期待値を推定したとしても、その結果現れる $\overline{\sigma}_{bs}$ の変化はわずかに0.8倍あるいは1.1倍程度 (TS_{AVG}で0.6dB) に収まる。より体長の小さな平均尾叉長20cmのスケトウダラ1歳魚の場合でも、平均尾叉長分布の標準偏差に相当する1.5cm分だけ期待値が変動した際の $\overline{\sigma}_{bs}$ の変化は0.9倍あるいは1.2倍程度 (TS_{AVG}で0.7dB) である。

すなわち、スケトウダラ魚群の分布位置情報から推定された年齢別平均尾叉長の期待値と真値とのずれの程度が $\overline{\sigma}_{bs}$ の推定に大きな影響を与えない範囲に収まっていたことが、 $\overline{\sigma}_{bs}$ (TS_{AVG}) の推定値と実測値の間で良い一致を見た理由であると考えられた。

魚群分布位置情報に基づいた年齢組成比の再現性および現存量推定値の手法間での比較

年齢別現存量の推定では、1歳魚及び5歳魚以上の現存量評価において、魚群分布位置情報に基づく魚群反応の年齢分解法と、第2章で用いた魚群と魚種確認結果を1対1で対応づける年齢分解法との間で大きな違いが生じた (Table 8)。(2.2) 式に示されるように、魚群反応の年齢分解には、年齢別 $\overline{\sigma}_{bs}$ と年齢組成比 p_i の双方が影響を与える。このうち $\overline{\sigma}_{bs}$ については、魚群分布位置から推定された1歳魚の $\overline{\sigma}_{bs}$ は試験操業で得られた $\overline{\sigma}_{bs}$ (比較時にはTS_{AVG}) と良く一致しており (Fig. 49)、かつ分布水深帯が100m以浅のごく狭い範囲に限られていることから (Fig. 48)、実測された尾叉長組成に基づく $\overline{\sigma}_{bs}$ と大きな相違は生じないと考えられた。また、5歳魚以上の $\overline{\sigma}_{bs}$ についても、MT-07のケース (Fig. 49) のように、推定値と実測値の差が若干大きくなるケースも見られたものの、多くの場合 $\overline{\sigma}_{bs}$ の差はTS_{AVG}で1dB以下に収まっていた。さらに、水深と平均尾叉長の回帰関係も見られないことから (Table 7)、やはり $\overline{\sigma}_{bs}$ の推定法の違いが魚群反応の年齢分解結果に与える影響は小さいと考えられた。そこで、魚群反応の年齢分解過程におけるもう一方の重要なパラメータである年齢組成比 p_i の再現性について検討した。魚群分布位置情報に基づく年齢分解法で求めた調査海域全体での5歳魚以上の現存量の推定値は、第2章で用いた年齢分解法による推定値の140%と、より大きな値を示した (Table 8D)。この理由としては、魚群分布位置情報に基づく年齢分解法における水深変化の影響が、最も深くかつ深度変化の大きな陸棚上部斜面域に多く分布する魚群量の評価に最も大きく現れたことが挙げられる。実際の漁獲試験によって得られた年齢組成の変化からも (Fig. 49)、より深い位置に分布する魚群において5歳魚以上の年齢群の組成比が大きくなることは明らかであり、水深との関係をロジスティック回帰で表現した方法そのものは適切であったと思われる。しかしながら、斜度の緩い陸棚域に分布する魚群反応と、斜度のきつくなる陸棚縁辺部および陸棚斜面域に分布する魚群反応とでは、その中の年齢組成比の変化が大きく異なる。本章で実施した位置情報に基づく魚群反応の年齢分解では、水深10m刻みで異なる年齢組成比および年齢別 $\overline{\sigma}_{bs}$ を適用した。斜度の緩い陸棚上に分布する魚群を分布水深に対応した年齢組成比を用いて分解する場合、一つの魚群に対して当てはまる年齢組成比のパターンは、多くとも数パターンで済み、かつその中で年齢組成比の変化もそれほど小さくなく、結果的に一つの魚群内における年齢組成比の変化はわずかな範囲に留まる。これは、一

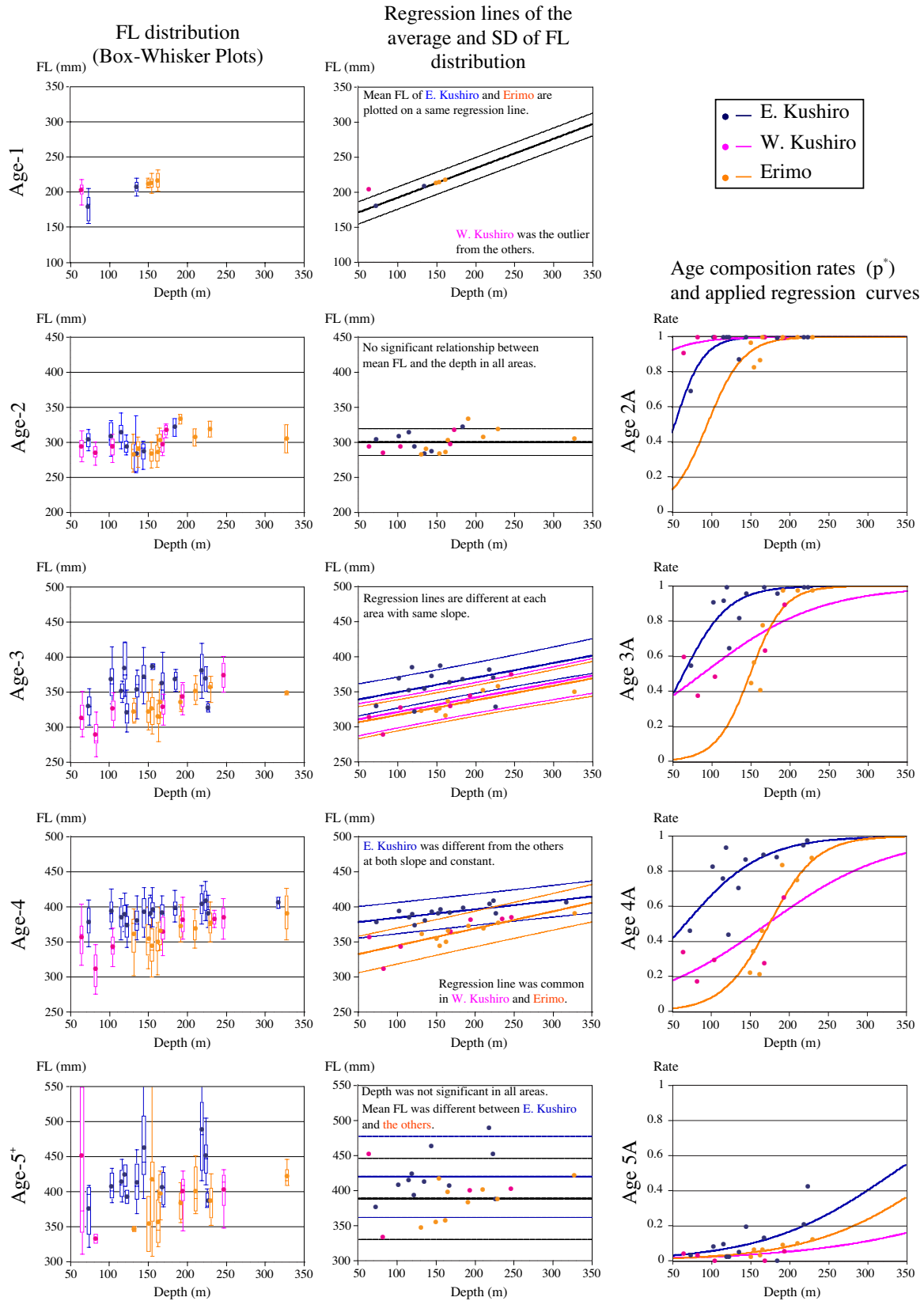


Fig. 50. Fork length (FL) distribution, regression lines and their SD of mean FL, and the age composition rate at each age and area in relation to the depth. Both thick and fine lines in the graphs of the center column indicate the regression lines and the ranges of SD of mean FL distributions against the depth

つの魚群に対して一つの漁獲試験の結果を当てはめて年齢分解を行う従来法とあまり相違は起こらない。それに対して、陸棚斜面域に分布する魚群反応は、一つの魚群反応の中で、深度が大きく異なるため、数多く

の年齢組成比が水深10m刻みで細かく魚群反応に対応することになる。その結果、魚群反応の沖合側では、同じ魚群の沿岸側に比べて高齢魚の割合が高く解釈されることになる。一方、実際の漁獲試験において陸棚

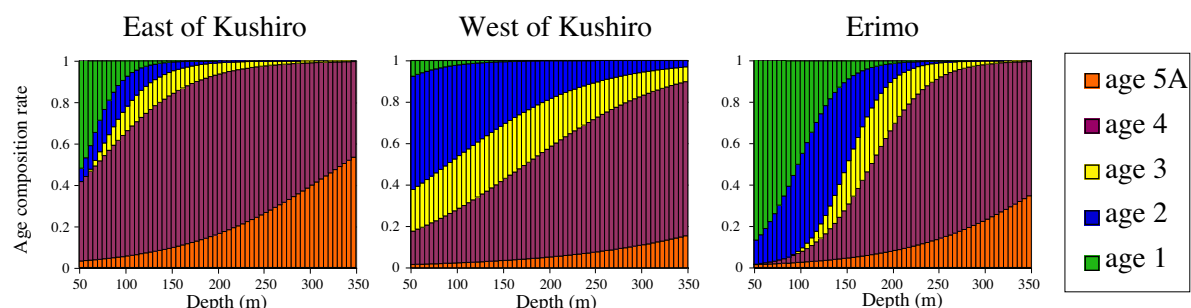


Fig. 51. Transitions of the age composition rates with increase in depth estimated from the logistic regression

Table 8. Variation of the results of stock estimation according to the applied methods of age decomposition

A Line-D (E. Kushiro)		Age-1	Age-2	Age-3	Age-4	Age-5≤	Total
Conventional		17,228	8,058	6,666	49,142	2,222	83,316
Age composition ratio (%)		(20.7)	(9.7)	(8.0)	(59.0)	(2.7)	(100.0)
This study		6,918	10,120	8,051	45,792	4,492	75,372
Age composition ratio (%)		(9.2)	(13.4)	(10.7)	(60.8)	(6.0)	(100.0)
Variation between the methods		40.2%	125.6%	120.8%	93.2%	202.2%	90.5%
B Line-M (W. Kushiro)		Age-1	Age-2	Age-3	Age-4	Age-5≤	Total
Conventional		269	21,382	10,104	7,578	669	40,001
Age composition ratio (%)		(0.7)	(53.5)	(25.3)	(18.9)	(1.7)	(100.0)
This study		859	14,346	8,606	10,653	1,008	35,473
Age composition ratio (%)		(2.4)	(40.4)	(24.3)	(30.0)	(2.8)	(100.0)
Variation between the methods		320.0%	67.1%	85.2%	140.6%	150.8%	88.7%
C Line-Q (Erimo)		Age-1	Age-2	Age-3	Age-4	Age-5≤	Total
Conventional		4,227	10,619	6,720	8,573	1,565	31,703
Age composition ratio (%)		(13.3)	(33.5)	(21.2)	(27.0)	(4.9)	(100.0)
This study		1,612	8,271	6,545	10,061	1,565	28,054
Age composition ratio (%)		(5.7)	(29.5)	(23.3)	(35.9)	(5.6)	(100.0)
Variation between the methods		38.1%	77.9%	97.4%	117.4%	100.0%	88.5%
*No. ind. on the rectangle along the transect: 8 nautical miles x the length of the transect.							×1,000 ind.
D Total quantity of the whole area		Age-1	Age-2	Age-3	Age-4	Age-5≤	Total
Conventional		35,911	85,915	62,369	185,768	18,216	388,178
Age composition ratio (%)		(9.3)	(22.1)	(16.1)	(47.9)	(4.7)	(100.0)
This study		20,591	70,990	54,695	201,713	25,514	373,503
Age composition ratio (%)		(5.5)	(19.0)	(14.6)	(54.0)	(6.8)	(100.0)
Variation between the methods		57.3%	82.6%	87.7%	108.6%	140.1%	96.2%

×1,000 ind.

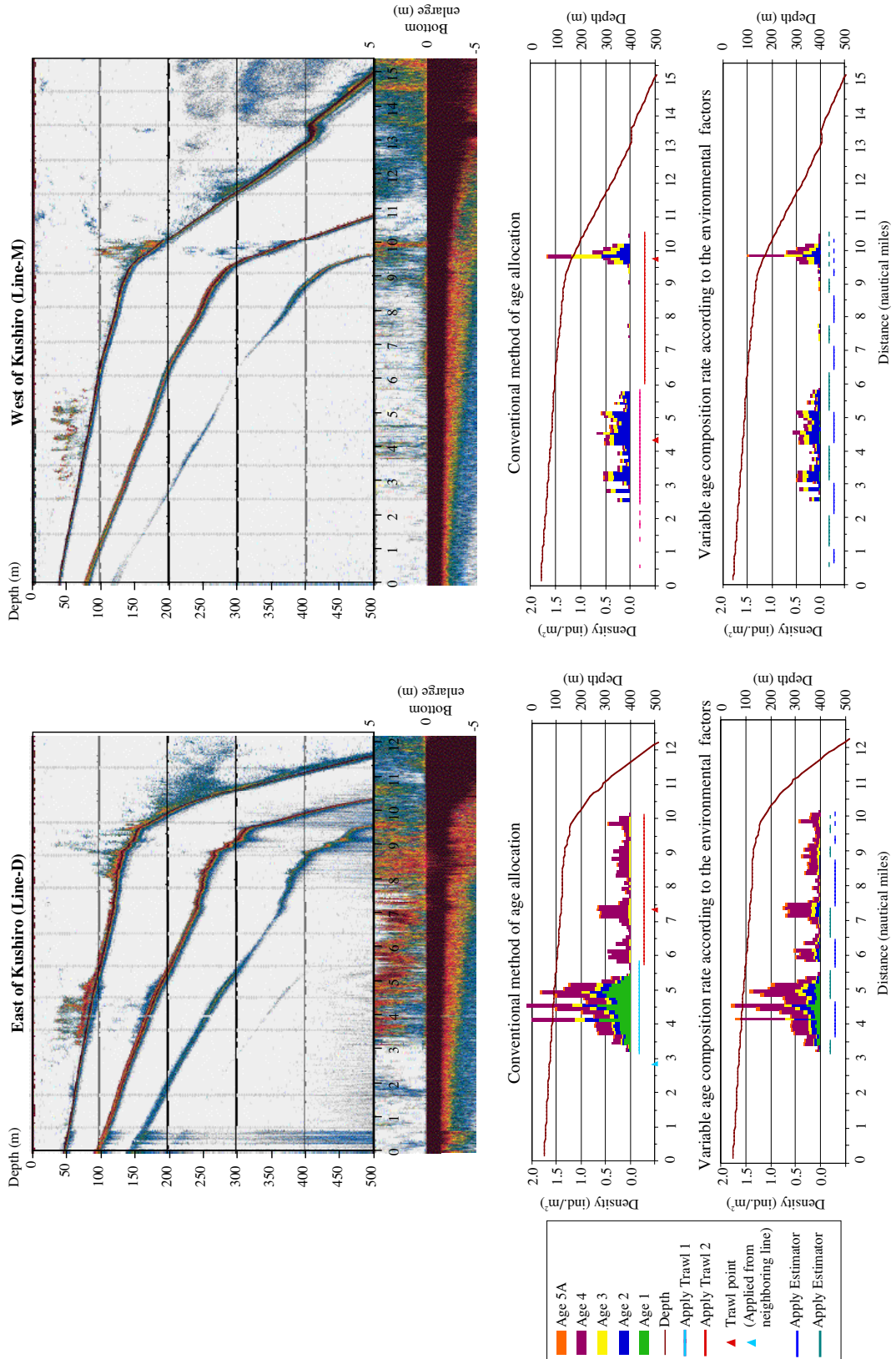


Fig. 52a. Results of the age allocation of echograms of walleye pollock using different estimation methods both of TS_{AVG} at age and the age composition rate (1)

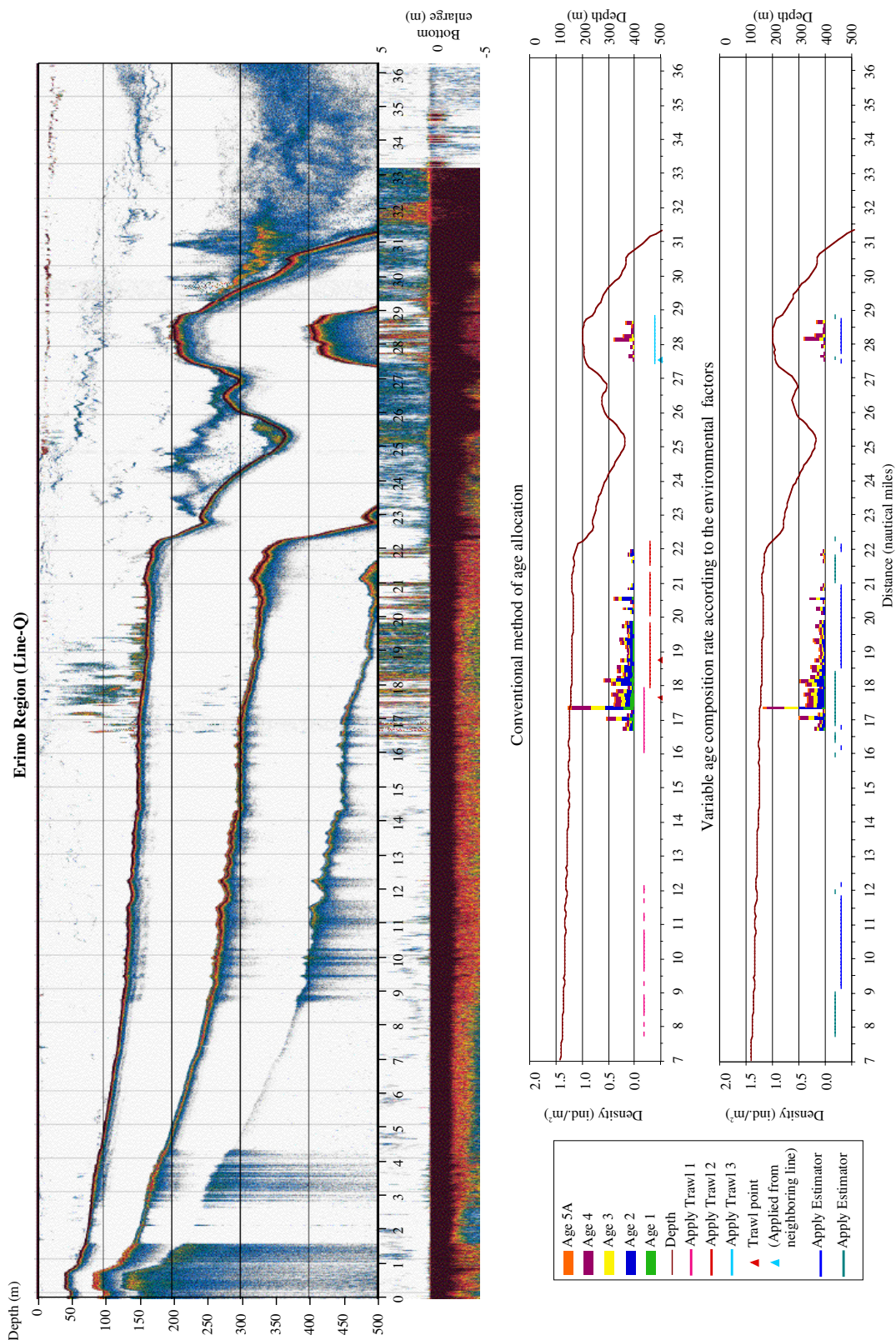


Fig. 52b. Results of the age allocation of echograms of walleye pollock using different estimation methods both of TS_{AVG} at age and the age composition rate (2)

縁辺部から上部斜面域にかけて分布する魚群を採集する場合、斜度の急な陸棚斜面域で曳網を行うよりも、水深の変化の少ない陸棚縁辺部で操業を行うことが多く、その結果が陸棚縁辺部～上部斜面域に分布する魚群全体の年齢組成比として適用される。そのため、陸棚縁辺部～上部斜面域に分布する魚群の年齢組成比は、陸棚斜面域を下るほど新たに適用した年齢分解法の方が高齢魚により偏る結果となる。このことが、高齢魚である5歳魚以上の現存量が従来法による推定値よりも大きく評価された要因であろうと考えられる。また、1歳魚の現存量評価については、調査海域全体としては従来法による現存量推定値の6割弱と少なく見積もられる結果となった (Table 8D)。しかし、定線毎に見ると、定線D (Table 8A) やQ (Table 8C) のように従来法の4割弱と少なく見積もられる場合と、定線M (Table 8B) のように従来法による推定値の3倍強と著しく多く見積もる場合の両方のケースが観察された。これは、1歳魚の分布パターンがパッチ的であることに由来すると考えられる。Fig. 48に示された各定線における年齢別の分布密度パターンからも、1歳魚群は、同じ海域内であっても定線によって分布したりしなかったりの差が大きく、同じ水深範囲に分布する魚群内での1歳魚の割合が大きく変動することがわかる。このように、1歳魚の分布パターンはより高齢の年齢群に比べてパッチ的な傾向が強く、道東海域を3海域に分割した程度の海域区分と現在の定線間隔の組み合わせでは十分に表現しきれないと考えられる。そのため、Fig. 49aのMTT02 (定線I) やFig. 49bのMT16 (定線Q) の例のように、本来分布しているはずの1歳魚の分布が、位置情報に基づく方法では十分に再現できなかったり、逆にFig. 49bのMT12 (定線P) のように、魚種確認では分布が確認されなかった場所に1歳魚の分布が予想されるといった相違が多く発生し、結果として年齢分解手法による現存量推定値の差に繋がったことが考えられる。

魚群分布位置情報に基づいた魚群反応の年齢分解法の有効性

上述の通り、年齢別平均後方散乱断面積: $\overline{\sigma_{bs}}$ は魚群分布位置による推定でも実際の漁獲試験による結果とほぼ同じ結果を示し、魚群分布位置による推定が有効であることが示された。その一方で、(2.2) 式による年齢分解において、 $\overline{\sigma_{bs}}$ とともに重要なパラメタである年齢組成比: p_i の再現性およびそれに基づく現存量推定値は、特に1歳魚及び5歳魚以上において、従来法による推定結果と大きく異なる結果が示された。5歳魚以上の推定現存量については、魚群分布位置情報を

いた場合の方が、従来法による推定値よりも大きくなる傾向が示され、これは特に沖合の上部陸棚斜面域に分布する魚群反応の解釈が異なることに由来すると考えられた。陸棚縁辺部から上部陸棚斜面域に掛けて連続的に分布するスケトウダラ魚群における年齢組成と水深の関係は、今回用いたデータにおける試験操業の結果からは明らかではない。そのため、第2章で用いた年齢分解法のように、多少分布水深が魚群内で変化しようとも、一つの魚群反応に対して一つの年齢組成比を当てはめるのが良いのか、それとも本章における試みのように、分布水深に応じて細かく年齢組成比を調節して解釈するほうが良いのか、本研究だけでは結論には至らない。しかし、音響資源調査によるスケトウダラ年齢別現存量推定の目的からすると、特に加入前の0, 1歳魚および加入直後の2歳魚の現存量推定が主たる調査対象であり、また第5章にて後述するように、音響資源調査による年齢別の現存量推定法では、3歳魚以上の現存量推定は難しく、実際の年級豊度を反映し難いと考えられる。よって、若齢魚の分布割合が少ない沖合の魚群反応の年齢分解において、5歳魚以上の現存量を多少大きく見積もったとしても、本来の調査目的からいけばそれほど大きな問題ではないということもできる。

一方、特に浅海域に分布する1歳魚の現存量推定値が年齢分解手法によって大きく異なった点については、調査の主たる対象年齢群でもあり、より深刻な問題であると考えられた。問題の背景がスケトウダラ1歳魚のパッチ的な分布生態にあることから、魚種確認のための試験操業の頻度が粗くなるほど、現存量推定の誤差が拡大することは容易に想像される。さらに、スケトウダラ1歳魚の $\overline{\sigma_{bs}}$ は、より尾叉長の大きな2歳魚以上の年齢群における $\overline{\sigma_{bs}}$ よりも小さいため、不適切な分配比率で魚群反応量が各年齢群に分けられた場合の現存量推定値は、高齢群に比べより大きく変動することになる。

これらのことを考慮すると、魚群の分布位置から年齢別の $\overline{\sigma_{bs}}$ と $p_{k \leq}$ を推定し、それに基づいて年齢組成比を決定し、魚群反応を各年齢に分解する本方法は、2歳魚以上の年齢群における現存量を推定するうえでは有効性が見いだせるものの、パッチ的分布をする1歳魚の現存量推定においてはあまり適切ではないと考えられた。この1歳魚のパッチ的分布については、魚種確認の頻度を増やす以外に精度を向上させる方法はない。従って、できるだけ多くの魚種確認の時間と労力を投下し、実際の魚群における年齢組成比を捉え、それに従って浅海域に分布する魚群反応を解釈するのが、現時点で最善の方法であると考えられる。しかし、一

連の解析の過程で、道東海域の中でも釧路の東西および襟裳周辺海域の3海域で体長組成や年齢組成に異なる傾向が見いだされたことは、スケトウダラの分布生態を考えるうえでは有用な成果であるといえる。また、1歳魚の現存量推定には不適切であっても、2歳魚以上の年齢群について、少数の魚種確認結果を用いて魚群反応の年齢分解をしなければならない様な場合には、本方法が有効な方法の一つとなるであろう。

第4章 音響資源調査における空間統計学の適用

音響資源調査では、あらかじめ設定した航走定線に沿って、航跡直下の魚群分布密度の情報が連続的に収録される。これを年齢別の分布尾数に変換し、さらに定線間隔を掛けることにより、調査海域全体における分布量とする過程は、第2章で述べた通りである。一方、得られた分布量の推定精度については、若干の検討を要する。通常の統計学的手法では、標本データの平均値が平均分布密度（あるいは量）となり、その標準誤差 (Standard error of mean, SEM) は、標本データの分散をデータ数で割った値の平方根 $\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}$ となる。この方法は、空間内に分布するサンプルが、その分布位置に関わらず互いに独立であることを前提とする。しかし、実際の生物資源の分布はむしろランダムでない場合の方が多い。それは、大漁した場所の近くではやはりたくさん魚が捕れ、逆に魚の捕れなかった場所の近くでいくら操業しても多くの漁獲は期待できないといったことから容易に想像できる。また、多くの音響資源調査においては、対象海域内をむらなく調査できるように、航走定線は均等な間隔で調査海域内に配置されることが多い。しかし、このような定線配置はランダムサンプリングではないため、サンプル間の相互独立を前提とする典型的な統計手法では、推定値の誤差分散を計算することができない。逆に、調査海域に対して全く無作為に定線を配置すると、非常に高密度に調査を行う部分と、調査定線の疎な部分が出現し、極端な場合は、全く調査定線の配置されない広大な海域が出現してしまう。この場合、調査海域全体に対する無作為抽出の条件は満足するものの、地域的な魚群分布のパターンを知りたい場合には、全く情報のない海域が生じてしまう。このような問題を回避するために、データ (= 航走定線) 間の独立を保ちつつ、海域全体をバランスよく網羅しうるような様々な調査定線の配置が模索され、提示されてきた (MacLennan and Simmonds, 1992)。

近年、水産資源解析の分野において、サンプル間の

自己相関を考慮に入れた空間統計学 (Geostatistics) という新たな統計手法が導入されるようになった (Rivoirard *et al.*, 2000)。これは対象物の空間分布構造を扱う統計学の一種で、バリオグラム (variogram) あるいはコバリオグラム (covariogram) などの、調査空間におけるデータ間の相互距離と自己相関との関係を表す関数を用いて、対象物の空間的な分布特性を記述する。これに基づいてデータの相互独立が保証できない条件下での密度分布の推定やそのSEMの推定を可能とするものである。

水産資源の分野で用いられる空間統計学は、大きく分けてIntrinsic法と1-D Transitive法と呼ばれる2種類である。Intrinsic法は2次元の調査範囲上に配置された点のデータから内挿推定を行うケース (トロール調査、海洋観測など) で用いられるが、1-D Transitive法は等間隔に配置されたデータから総量の推定を行うケース、特に音響資源調査で多く利用されている (Petitgas, 1993; Williamson and Traynor, 1996)。本章では、第2章で示した年齢別現存量推定値のSEMを1-D Transitive法を用いて推定し、従来の統計手法によって得られる現存量のSEMとの相違について検討した。また、調査定線の間隔とSEMの関係を1-D Transitive法を用いて求め、同海域におけるスケトウダラ魚群の分布の特徴を捉えとともに、適切な調査定線間隔について検討した。

なお、空間統計学の適用の如何に関わらず、多くの音響資源調査においては、調査はスナップショット的に実施され、生物の分布の変化に要する時間に比べて十分に短いものとして扱い、調査中の時間経過に伴う魚群分布状況の変化は考慮していない。仮に調査中の時間の経過を考慮する場合には、空間的な自己相関とは別に、時間の経過による相関についても検討の対象となるが、以下の節では時間経過による影響はないものとし、空間的自己相関についてのみ扱う。

4.1 1-D Transitive法による年齢別現存量の標準誤差の推定

材料と方法

1996年6月以降2002年1月までの間に実施した調査航海のうち、毎年6月 (1998年のみ7月) および1月に実施した調査において得られたデータから、調査定線別に計算したスケトウダラ年齢別分布尾数を抽出し、解析に用いた。これらのデータは、第2章において年齢別現存量の推定に用いたデータと同じものである。

1-D Transitive法の理論

1-D Transitive法 (Petitgas, 1993) を適用できる

データの必要条件として、データが等間隔で並んで得られることが求められる。また、この方法で推定されるのは対象資源の現存量推定値とそのSEMのみであり、測点以外の任意の地点における値の推定や、それに基づく分布状態のコンター表示などはできない。

いま、ある1次元上の資源の分布を考える (Fig. 53 上図)。資源の分布様式は関数 $k(x)$ で示されている。グラフの横軸は1次元上でのデータあるいは観測の位置、縦軸はその場所に分布する量の真値である。よって、関数 $k(x)$ を積分して曲線の下面積を求めれば、現存量の真値を得られる。

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} k(x) dx \quad (4.1)$$

しかし、当然のことながら真の分布様式 $k(x)$ は未知であるから、その積分も不可能である。

そこで、この現存量を推定するために測点を配置して観測を行う。任意の場所に測点配置の原点 x_0 を決め、そこから等間隔 a で観測点を $x_0 + pa$ (p は整数) の位置に配置していく。この場合、ある観測点 $x_0 + pa$ における測定値 $k(x_0 + pa)$ は、位置 $x_0 + (p - \frac{1}{2})a$ から $x_0 + (p + \frac{1}{2})a$ までの区間における $k(x)$ の代表値と見なすことができる。よって、 $k(x_0 + pa)$ に測点間隔 a を掛けた値を全ての測点分足し合わせれば、現存量の不偏推定値

$$S^*(x_0) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} ak(x_0 + pa) = a \sum_{p=-\infty}^{\infty} k(x_0 + pa) \quad (4.2)$$

が求まる。これはFig. 53下図のグラフ上で、横に並んだ棒グラフの面積を全て足し合わせることに等しい。

この観測では、測点の原点 x_0 を任意に決定し、そこから距離 a 刻みで測点を配置していった。もし、この測点の原点 x_0 が少しずれて配置されたとすれば、Fig. 53下図の棒グラフにおける各々のバーの高さは若干変化し、その結果として棒グラフの総面積、すなわち現存量の不偏推定値 S^* も変化することが想定される。これが推定値 S^* のばらつきである。逆に、測点の原点 x_0 を測点間隔 a の間で徐々にずらしながら得た推定現存量 S^* を平均した値が真値 S である：

$$\frac{1}{a} \int_0^a S^*(x_0) dx_0 = S \quad (4.3)$$

推定値 S^* の誤差分散 (SEM の 2 乗) は、真値 S から推定値 S^* を引いた差の 2 乗で与えられるので、

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{a} \int_0^a (S - S^*(x_0))^2 dx_0 \quad (4.4)$$

と示される。この式は、展開すると

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 &= \frac{1}{a} \int_0^a (S^2 - 2S \cdot S^*(x_0) + S^*(x_0)^2) dx_0 \\ &= S^2 - \frac{2S}{a} \int_0^a S^*(x_0) dx_0 + \frac{1}{a} \int_0^a S^*(x_0)^2 dx_0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここで第2項に (4.3) 式を代入して

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 &= \frac{1}{a} \int_0^a (S^2 - 2S \cdot S^*(x_0) + S^*(x_0)^2) dx_0 \\ &= \frac{1}{a} \int_0^a S^*(x_0)^2 dx_0 - S^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

となる。

ここで、(4.6) 式の第2項を式変形する目的で、距離 h 離れた2点 x と $x+h$ における分布尾数 $k(x)$ と $k(x+h)$ の乗算結果を全ての x について積分した“コバリオグラム (geometric covariogram, $K(h)$)”と呼ばれる式を導入する。この値は、ある距離間隔におけるデータ間の自己相関の度合いを示す：

$$K(h) = \int_{-\infty}^{\infty} k(x) \cdot k(x+h) dx \quad (4.7)$$

この式を、あらゆる2点間の距離 h で積分すると、この式は現存量の二乗と等しくなり、

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(h) dh = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k(x) \cdot k(x+h) dx dh = S^2 \quad (4.8)$$

になる。

(4.6) 式の第1項は

$$\int_0^a S^*(x_0)^2 dx_0 = a^2 \sum_{p=-\infty}^{\infty} K(pa) \quad (4.9)$$

と表せるので、結局 (4.6) 式は

$$\sigma_s^2 = a \sum_{p=-\infty}^{\infty} K(pa) - \int_{-\infty}^{\infty} K(h) dh \quad (4.10)$$

と書き直すことができる。

(4.10) 式の第1項は、サンプリング間隔 pa 毎に $K(pa)$ が得られるために計算可能である。第2項の $K(h)$ は不明であるが、以下の方法によりモデルを近似させて求めることが可能である。

まず、データから $K(pa)$ のグラフを書く。これを経験的コバリオグラム (Experimental covariogram) と呼ぶ (Fig. 54破線)。次に、このグラフに理論コバリオグラム (Model covariogram) を当てはめる (Fig. 54実線)。理論コバリオグラムの当てはめにあたっては、あらかじめ用意された数種類のモデルの中から

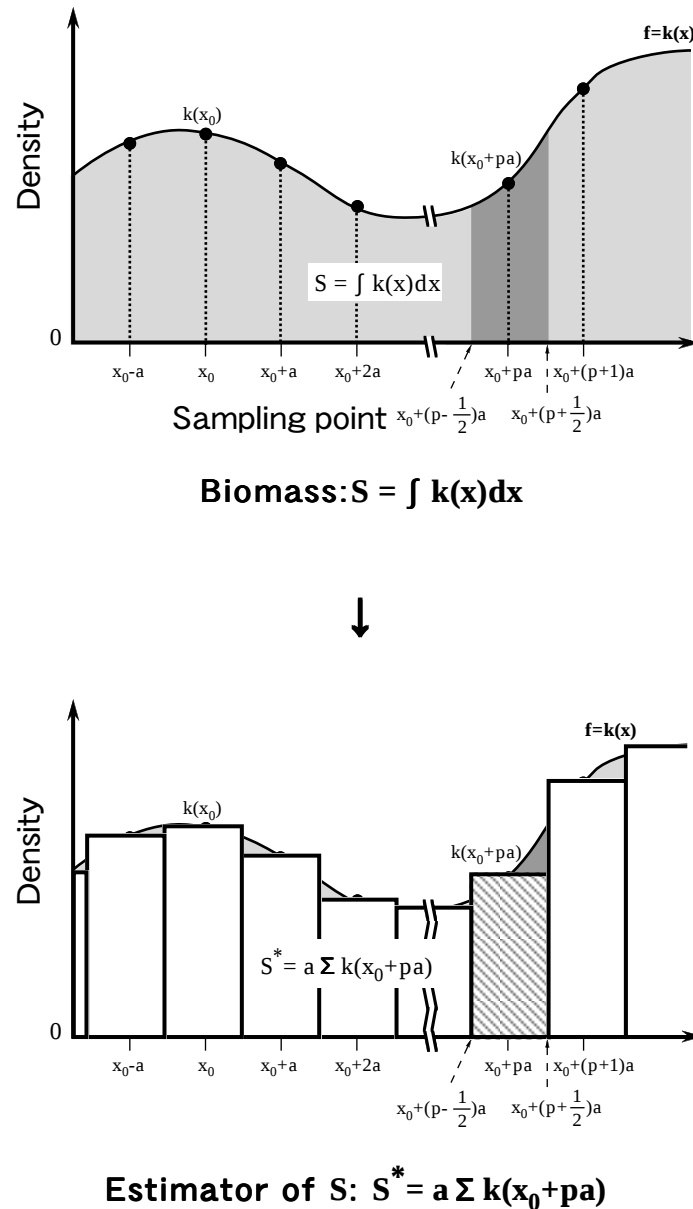


Fig. 53. Schematic figure explaining the theory of the 1-D transitive method

一つあるいは複数のモデルを選択し、それらのパラメータを調整し、組み合わせながら経験的コバリオグラムへの当てはめを行う。1-D Transitive法で使用可能な関数としては、球形モデル(Spherical model)、指数モデル(Exponential model)、ガウスモデル(Gaussian model)、線形モデル(Triangular model)の4種類の関数が用意されている(Petitgas and Prampart, 1993)。なおコバリオグラムでは、原点での高さをシル(sill)、コバリオグラムが0になる距離をレンジ(range)と呼ぶ。シルはデータ間の分散の大きさを示し、シルが大きいほど、そのデータセットにおける分散が大きい

ことを示す。また測点間隔の倍数距離のことをラグ(lag)と呼ぶ(距離 $pa = \text{lag } p$)。一般にコバリオグラムの曲線は、原点付近では高い値をとるものの、レンジが原点から数ラグ程度離れる間に急激に低下し、その後はレンジの増加に伴い緩やかに減少し、0に達する(Fig. 54)。これは、データを収録した地点間の距離が近い場合には、データ間の自己相関も大きいものの、データ収録地点間の距離が広がるにつれて、データ間の自己相関が急速に小さくなることを示す。よって、理論コバリオグラムのグラフの傾きが原点付近で急激に低下するか、あるいは比較的遠い距離まで緩や

かに減少するかによって、使用したデータセットにおける空間自己相関のパターンを判断することができる。

理論コバリオグラムの当てはめにおけるいくつかの重要なルールについては、Williamson and Traynor (1996) が以下のように整理している：

- 1) 理論コバリオグラムのシル（複数の関数を組み合わせている場合は、それぞれのシルの合計値）は、ラグ=0における経験的コバリオグラムの値に一致させる。
- 2) 理論コバリオグラムのレンジ（複数の関数を組み合わせている場合は、最も長いレンジのモデルにおけるレンジ）は、調査海域の長さ（＝最大ラグ）に一致させる。
- 3) 誤差分散は、原点付近での理論コバリオグラムの振る舞いに大きく影響されるので、特に最初の数ラグ分の区間が正確に当てはまるように配慮する。

以上のように、理論コバリオグラムの当てはめについてはいくつか押さえておくべき要点があるが、実際には最適な当てはめ方に関する機械的、客観的な方法はまだ無く、めのこによって当てはめた理論コバリオグラムの妥当性を判断している。

そして、経験的コバリオグラムと理論コバリオグラムの両者を積分し、(4.10) 式に従って減算すると、推定した現存量の誤差分散（平方根を取るとSEM）が得られる。

1-D Transitive 法による現存量推定値のSEMの推定方法

上述の理論を用いて実際のデータから現存量推定値のSEMを求める過程について、1996年6月に実施した調査結果を例に説明する。

道東海域に、調査定線を8カイリ間隔で平行に18本設定し、スケトウダラ魚群反応を収録した（Fig. 55）。第2章で述べた通り、この調査で得られた陸棚上の魚群反応のほとんどはスケトウダラ1歳魚であったと考えられる。データは航走0.1カイリ毎に平均化された海面1㎡あたりの分布尾数として得られる。航跡下における魚群分布密度の大小をFig. 55の地図上に細い棒グラフで示した。調査で捉えられた魚群反応は、各定線の両端よりも内側のみに分布していたことから、航走定線の範囲は魚群の分布域を完全に網羅していたものとみなせる。

得られたデータは航跡に沿って2次元上に分布するが、これをFig. 53に示した1次元の分布に換算する。各定線上に一列に並んだ魚群分布密度を定線毎に足し合わせ、定線配置の順番にしたがって棒グラフの形に並べる（Fig. 55右下の棒グラフ）。棒グラフの幅を定

線間隔と考えれば、この棒グラフの面積が調査面積内の現存量推定値となる。データは定線上では0.1カイリ間隔で分布しているので、各定線直下に分布する魚群量の算出に当たっては、定線上のデータの合計値にデータの平均間隔0.1カイリ（＝185.2m）を掛ける必要がある。さらに、調査海域全体の推定現存量に引き延ばす際には、先に得られた定線毎の魚群量に定線間隔8カイリ（＝14,816m）を掛けた後に、全ての定線分を足し合わせる。

次に、現存量の推定誤差を評価する。なお、これ以降の作業は1-D Transitive法の計算を行うソフトウェアEVA2 (Petitgas and Lafont, 1997) を用いて行った。ソフトウェアに定線毎の魚群分布量データおよび定線間隔を入力すると、Fig. 54に破線で示した経験的コバリオグラムが描画される。この上に、ソフト側で用意している数種類の関数を、パラメタを調整しながら重ねることで、最も当てはまりの良さそうな理論コバリオグラムを求める。1996年6月の調査結果の例では3つの異なる関数を組み合わせて理論コバリオグラムを作成し、経験的コバリオグラムに当てはめた（Fig. 54実線）。あとは(4.10) 式にしたがい両者を積分した後に減算すれば誤差分散（平方根を取ればSEM）が得られるが、これらの計算はソフトウェアが自動的に行う。

結 果

調査航海別、年齢別に経験的コバリオグラムを描画し、それらに当てはまるように2～3種類のモデルを組みあわせて理論コバリオグラムを求め、年齢別現存量推定の誤差分散 σ_{EST}^2 およびその平方根であるSEMを得た（Table 9, Fig. 46）。また、年齢別現存量推定値、1-D Transitive法で得たSEM、従来の統計手法に基づいて計算されたSEMおよびそれぞれの方法で求められたSEMの現存量推定値に対する変動係数（Coefficient of Variation, CV）をTable 10に示した。

計算の結果、1-D Transitive法を用いて求めたSEMによる推定現存量のCVは、最大でも40%程度、多くのケースでは10～20%程度に留まった。データ間の独立を前提とする従来の統計手法に基づいて計算したSEMがしばしば推定値の5割を超える大きな値を示したのに比べ、1-D Transitive法によって求められたSEMは、従来法によって得られるSEMの1/2～1/15まで推定誤差を縮小する効果が見られた（Table 10）。

考 察

音響資源調査による現存量推定値の精度評価に1-D Transitive法を導入することにより、推定現存量の

SEMを、従来の統計手法による値の数分の1まで縮小することができた。採用する統計手法によって推定値の信頼性が変化するの、データの空間的な自己相関を利用するか、その考えを無視してデータを相互に独立と仮定するかの違いから生じている。サンプル間に距離に応じた自己相関があるとするのが空間統計学の特徴であり、この自己相関の度合いが大きいほど、SEMは従来法に比べて小さくなる。逆に、データ間に全く自己相関が認められない場合、SEMは従来法による値と全く同じになる。道東海域に分布するスケトウダラの場合、定線毎に得られた魚群分布量の間には、距離に応じた自己相関が見られ、それによるSEMの軽減効果はあると判断された。このようなデータに対してデータの相互独立を仮定することは、データの位置関係の情報および自己相関の情報を切り捨て、誤差を過大に評価することになる。従来の統計手法を用いて推定現存量のSEMを求めた場合には、CVが50%を超える大きな値をとる場合がしばしば見られた (Table 10)。通常であれば、このように大きなSEMを伴う推定値は、その精度に問題があるという評価を受ける。しかし、同じデータに対して1-D Transitive法を適用すること

により、SEMが従来法の数分の一まで小さくなるということは、データ群の中での各データの大小差は大きくとも、その空間的な配列には自己相関性が働いていたこと、すなわち大きな値と小さな値が全く無作為に分布していたわけではなく、大きな値同士、小さな値同士がある程度近接した位置に分布していたことを示唆するものである。よって、同調査条件下で収録されたデータの解釈に、1-D Transitive法を適用し、自己相関関係を考慮に入れる解釈は適切であるといえる。

ただし、その計算過程については今後検討すべき問題も残されている。本研究では、Petitgas and Prampart (1993) および Petitgas (1996) に従い、理論コバリオグラムの経験コバリオグラムへの当てはめにおけるパラメタ調整を、グラフ上で"めこの"で行った。実際のところ、原点付近の数ラグ分におけるコバリオグラムの当てはめさえ適切に行われれば、モデル選択のパラメタが多少異なったとしても、得られるSEMにはほとんど影響を与えない。しかし、計算する者によっては同じデータに対して異なるパラメタが選択される可能性があり、さらにそれが計算者の主観に依存するという点では、客観性および再現性の面で問

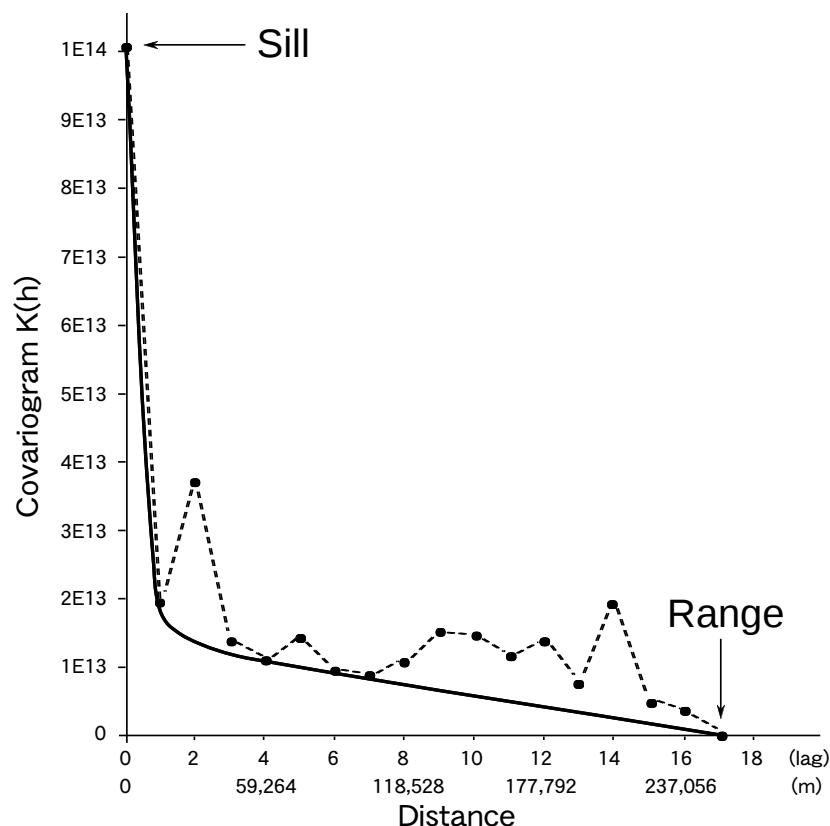


Fig. 54. Experimental 1-D transitive covariogram of the cumulated echoes. The model fitted is $K(h) = \text{spherical (sill=454,000; range=18,000)} + \text{spherical (sill=45,000; range=70,000)} + \text{Triangular (sill=85,000; range=251,872)}$

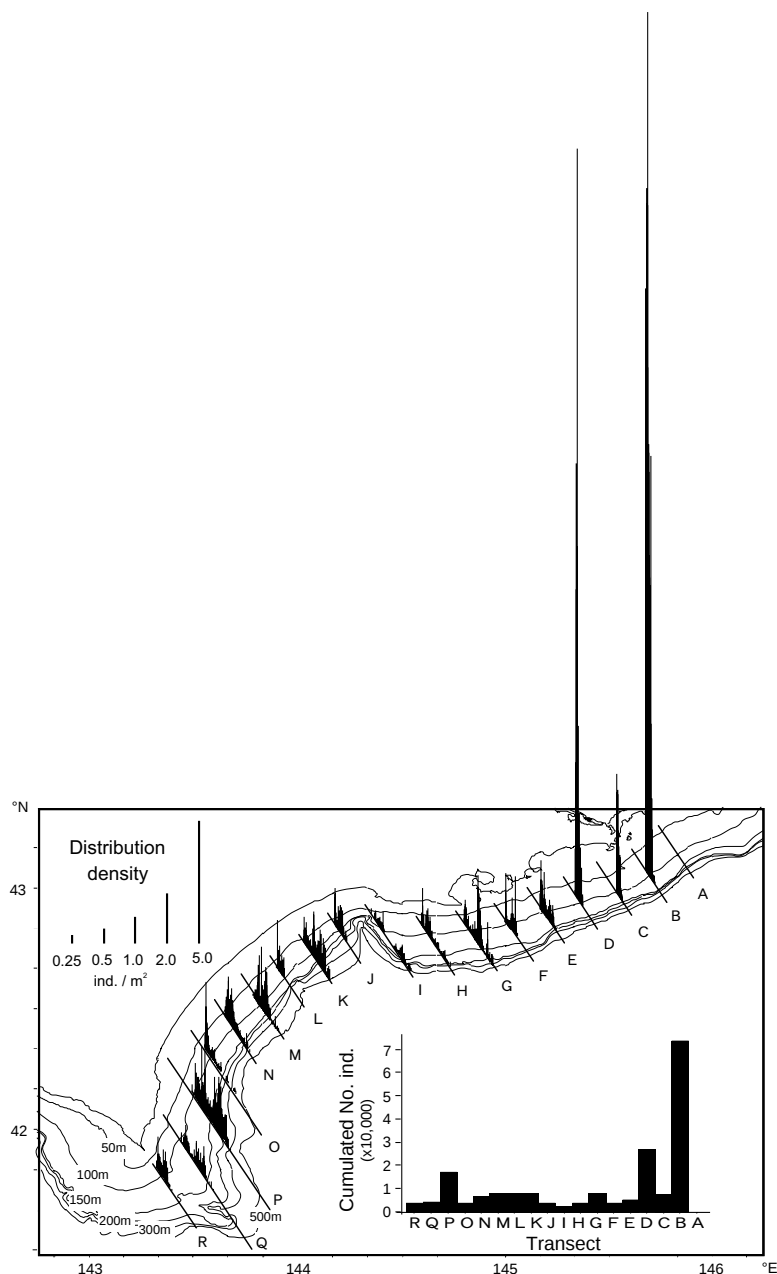


Fig. 55. Distribution pattern of age-1 walleye pollock and their cumulated number of individuals at each transect in June 1996

題が残る。この問題については、まだ一般化には至っていないが、理論バリオグラムの当てはめに際して非線形最小二乗法や最尤法を用いた客観的な関数選択方法が検討されている（パーロー、1986）。今後、計算者の主観によらないモデル選択方法の提示が期待される。

また、1-D Transitive 法で得たSEMからは、直接的に推定値の区間推定を行うことができない点にも留意する必要がある。従来の統計手法では、推定値の分布が正規分布あるいはt分布などあらかじめ決まった分布型に従うことを想定しており、それゆえ正規分布表やt表を用いてSEMから簡単に推定値の信頼区間を算

出することが可能であった。しかし1-D Transitive 法では、推定値の分布型を考慮していないため、推定値のSEMが得られても、そこからすぐに信頼区間の推定には結びつかない。推定値の信頼区間の算出を必要とする場合には、推定値の分布をシミュレーションした上で、区間推定を行うなど、新たな取り組みが必要である。

4.2 1-D Transitive 法による調査定線間隔の最適設定

音響資源調査の設計において、調査定線間隔の設定

は、調査結果の精度を保ち、また適切な解釈法を選択するうえで非常に重要である。特に、現存量推定値のSEMを1-D Transitive法で求めようとする場合、平行・等間隔に定線を配置することが必要条件となるが、その際に定線間隔をあまりに広く設定すると、データ間の自己相関が捉えられず、単なる系統抽出法と同じことになってしまい、1-D Transitive法を採用する利点が活かされない。また、スケトウダラ魚群分布パターンがパッチ的である場合には、定線間隔が拡大すると、そのパッチを捉える確率が低下し、結果的に推定される現存量の変動が大きくなることが予想される。本調査を始めるにあたっては、約10日間で道東海域を走査することを目標として調査を設計し、定線間隔を8カイリに設定した。その結果、4.1節で示したように、道東海域におけるスケトウダラの分布パターンには空間的な自己相関関係が存在し (Fig. 54)、推定現存量のSEM推定に1-D Transitive法が有効であることが示された。しかし、初期値として設定した8カイリの定線間隔が、同海域に分布するスケトウダラの現存量およびSEM推定において最適な間隔であるか否かについては改めて検討する必要がある。本節では、適切な調査定線間隔の探索を目的として、実験的に定線間隔を変化させ、スケトウダラの現存量推定値およびSEMにどのような変化が生じるかについて検討した。

材料と方法

定線間隔の調節実験には、2種類のデータセットを用いた。定線間隔の拡大に伴う現存量推定値およびSEMの変化の解析には、4.1節でも用いた1996年6月の調査時に得られた昼間航走時のデータを用いた。8カイリ間隔で設定された定線毎に得られたスケトウダラ1歳魚の現存量データのうち、(1) 全ての定線から得られる分布情報を用いた場合、(2) 1本おきの定線から得られる分布情報のみを用いることにより、定線の間隔を2倍 (16カイリ) にして計算した場合、(3) 2本おきの定線から得られる分布情報のみを用いることにより、定線の間隔を3倍 (24カイリ) にして計算した場合、の3パターンについて、現存量推定値およびそのSEMを計算した。このとき、1本あるいは2本おきに定線情報を用いる場合、始点をいずれの定線に置くかによって、1本おきの定線情報を用いた場合には2種類のデータが、また2本おきの定線情報を用いた場合には3種類のデータが発生することになる。

一方、定線間隔を8カイリより狭くした場合の効果については、1998年7月の調査時に実験的検討を行った。襟裳岬南東沖合海域に集中的に分布したスケトウダラ1, 2歳魚を対象として、通常の定線の中間に補助

定線を設け (Fig. 56)、通常定線の航走終了後に補助定線を航走することにより、定線間隔4カイリでの魚群分布情報を収録した。補助定線についても通常定線と同様に昼夜それぞれ別々に航走し、データを収録した。

結果

それぞれの定線の組み合わせにおいて得られる現存量推定値とそのSEMをTable 11およびFig. 57に示した。今回の解析に使用したデータセットでは、海域の東側、根室半島沖に大量の魚群が集中的に分布したことが特徴で (Fig. 55)、この魚群分布を捉えた定線を組み合わせの中を含むか否かによって、現存量推定値およびSEMは大きく変動した (Table 11, Fig. 57)。各定線の組み合わせにおける、定線別の累積魚群分布尾数をFig. 58に示した。このグラフから、定線BおよびD上に分布する魚群量が他の定線に比べて極めて大きく、これらの定線を含む組み合わせ (Fig. 58A, B, D, F) においては、現存量推定値は上昇し、データ間の分散も拡大した。一方、これらの定線を含まない組み合わせ (Fig. 58C, E) においては、各定線における分布量は低い水準にとどまり、かつデータ間の分散も小さくなることが示された。また各定線の組み合わせにおけるコバリオグラムにおいても、定線BおよびDを含む組み合わせにおいては (Fig. 59A, B, D, F)、原点付近におけるシルの高度が上昇し、SEMの拡大につながったことが示された。

1998年7月に実施した補助定線の追加実験では、調査を実施した時間帯によって補助定線の効果に違いが現れた (Table 12, Fig. 60)。昼間の調査結果に基づく1, 2歳魚の現存量推定値およびSEMは、補助定線の追加により共に減少した (Table 12, Fig. 60)。また現存量推定の精度を示すCVは1歳魚では21%から13%へ、2歳魚においては22%から14%へと減少し (Table 12)、補助定線の追加による推定精度の向上がみられた。しかし、夜間の調査結果に基づいて同様の計算を行った場合には、補助定線を追加しても現存量推定値およびSEMの双方ともに大きな変化はみられず (Table 12, Fig. 60)、また推定現存量のCVも20%の前後で殆ど変化せず (Table 12A)、推定精度向上の効果はみられなかった。これらの計算に用いた定線毎の魚群分布量をFig. 61に示した。昼間の調査結果における1, 2歳魚の分布パターンからは (Fig. 61上図)、定線Qに分布量のピークがあり、定線Qから遠ざかるとともに定線別分布量が徐々に減少する傾向がみられた。これは、基本定線のみで調査を行った場合でも、補助定線を追加した場合においてもほぼ同様のパターンであった。それに対して、夜間の調査結果に基づく分布

Table 9a. Parameters of model covariograms to fit to the experimental covariogram (1)

Survey period	Time Age	No. Transect	Mean ind./line	σ^2	Experimental covariogram		Model covariogram									$\sigma^2_{Est.}$	SEM by transitive (x10 ⁶ ind.)
							Model 1			Model 2			Model 3				
					Sill	Range	Model	Sill	Range	Model	Sill	Range	Model	Sill	Range		
Jun. 1996 Day																	
	1	17	11,104.1	2.9E+08	9.9E+13	251,872	Sph	7.7E+13	18,000	Sph	7.6E+12	70,000	Tri	1.4E+13	251,872	2.1E+17	458.1
Night																	
	1	18	6,538.1	3.5E+07	2.0E+13	266,688	Sph	9.0E+12	18,000	Tri	8.0E+12	240,000	Tri	3.0E+12	266,688	2.5E+16	158.9
Jan. 1998 Night																	
	0	15	57.6	3.4E+03	1.4E+09	222,240	Sph	6.0E+08	20,000	Sph	8.0E+08	222,240				1.7E+12	1.3
	1	15	702.6	1.1E+06	3.3E+11	222,240	Sph	3.0E+11	45,000	Sph	3.0E+10	222,240				3.7E+14	19.1
	2	15	5,383.7	1.7E+08	4.2E+13	222,240	Sph	4.0E+13	32,000	Tri	1.8E+12	222,240				6.3E+16	251.7
	3	14	525.1	2.6E+06	5.5E+11	207,424	Sph	5.4E+11	19,000	Tri	1.3E+12	207,424				1.4E+15	37.2
	4	5	18.2	1.1E+03	-	-											
Jul. 1998 Day																	
	1	7	1,157.5	2.8E+06	3.9E+11	103,712	Exp	3.9E+11	52,000							8.3E+14	28.8
	2	18	656.0	2.4E+06	7.3E+11	266,688	Sph	5.4E+11	37,000	Exp	1.9E+11	80,000	Tri	1.0E+09	266,688	1.1E+15	32.7
	3	19	1,337.1	2.2E+06	1.1E+12	281,504	Sph	5.7E+11	33,000	Tri	3.1E+11	250,000	Tri	2.0E+11	281,504	9.4E+14	30.7
	4	19	112.3	2.5E+04	1.0E+10	281,504	Sph	6.2E+09	26,000	Exp	2.0E+09	150,000	Tri	2.0E+09	281,504	1.6E+13	4.0
Night																	
	1	10	458.2	5.4E+05	1.0E+11	148,160	Sph	4.7E+10	18,000	Tri	5.5E+10	63,000	Tri	1.0E+09	148,160	1.6E+14	12.5
	2	18	448.7	6.6E+05	2.2E+11	266,688	Sph	7.0E+10	44,000	Exp	1.5E+11	60,000	Tri	1.0E+09	266,688	3.7E+14	19.2
	3	19	1,555.3	4.4E+06	1.9E+12	281,504	Sph	8.6E+11	26,000	Exp	7.5E+11	100,000	Tri	2.5E+11	281,504	2.9E+15	54.0
	4	19	125.8	1.2E+04	7.8E+09	281,504	Sph	3.8E+09	44,000	Tri	3.0E+09	250,000	Tri	1.0E+09	281,504	5.4E+12	2.3
Jan. 1999 Day																	
	0	19	9.3	3.1E+02	1.1E+08	281,504	Sph	9.4E+07	35,000	Tri	1.4E+07	85,000	Tri	1.0E+06	281,504	1.5E+11	0.4
	1	19	363.5	8.5E+05	2.6E+11	281,504	Gau	2.4E+11	29,000	Tri	1.8E+10	75,000	Tri	3.0E+09	281,504	7.5E+13	8.7
	2	19	218.8	3.2E+05	1.0E+11	281,504	Sph	5.9E+10	34,000	Exp	4.0E+10	50,000	Tri	1.0E+09	281,504	1.8E+14	13.4
	3	19	261.9	3.1E+05	1.0E+11	281,504	Sph	4.6E+10	16,000	Sph	5.0E+10	52,000	Tri	5.0E+09	281,504	1.9E+14	13.9
	4	19	6.5	5.5E+01	2.7E+07	281,504	Sph	1.6E+07	18,000	Sph	5.8E+06	120,000	Tri	5.0E+06	281,504	4.5E+10	0.2
	5	2	-	-	-	-											
	6	10	2.2	1.0E+01	2.1E+06	148,160	Sph	1.9E+06	16,000	Gau	1.6E+05	140,000	Tri	5.0E+04	14,816	5.9E+09	0.1
	7	7	1.1	1.1E+00	2.1E+05	103,712	Sph	1.2E+05	15,000	Sph	9.0E+04	103,712				4.9E+08	0.0
Night																	
	0	19	27.4	2.3E+03	8.3E+08	281,504	Sph	7.5E+08	33,000	Tri	7.0E+07	75,000	Tri	1.5E+07	281,504	1.2E+12	1.1
	1	19	325.0	5.0E+05	1.6E+11	281,504	Sph	1.6E+11	55,000	Tri	5.0E+09	180,000	Tri	1.0E+09	281,504	1.7E+14	12.9
	2	19	217.5	2.0E+05	6.7E+10	281,504	Sph	6.3E+10	55,000	Tri	2.4E+09	150,000	Tri	1.0E+09	281,504	6.7E+13	8.2
	3	19	315.4	2.0E+05	8.2E+10	281,504	Gau	7.2E+10	50,000	Tri	6.0E+09	160,000	Tri	4.0E+09	281,504	4.1E+12	2.0
	4	19	13.2	5.4E+02	1.9E+08	281,504	Sph	1.3E+08	24,000	Sph	5.0E+07	45,000	Tri	1.3E+07	281,504	3.9E+11	0.6
	5	2	-	-	-	-											
	6	10	2.7	2.6E+01	4.5E+06	148,160	Sph	3.8E+06	24,000	Sph	6.0E+05	62,000	Tri	1.0E+05	148,160	1.0E+10	0.1
	7	7	2.3	1.6E+01	2.0E+06	103,712	Sph	1.2E+06	20,000	Sph	7.0E+05	45,000	Tri	4.0E+04	103,712	4.0E+09	0.1
Jun. 1999 Day																	
	1	19	127.6	7.9E+04	2.6E+10	281,504	Sph	1.0E+10	18,000	Sph	1.5E+10	58,000	Tri	9.0E+08	281,504	4.1E+13	6.4
	2	19	305.2	1.4E+05	6.3E+10	281,504	Sph	3.3E+10	18,000	Sph	1.2E+10	140,000	Tri	1.8E+10	281,504	9.4E+13	9.7
	3	19	221.6	3.8E+04	2.4E+10	281,504	Sph	1.0E+10	16,000	Tri	1.2E+10	255,000	Tri	2.0E+09	281,504	3.3E+13	5.7
	4	19	659.9	6.0E+05	2.8E+11	281,504	Sph	1.4E+11	35,000	Sph	1.4E+11	281,504				2.4E+14	15.4
	5	19	57.3	2.9E+03	1.7E+09	281,504	Sph	7.3E+08	95,000	Sph	9.6E+08	281,504				6.0E+11	0.8
	6+	14	10.1	1.2E+02	4.4E+07	207,424	Sph	8.0E+06	26,000	Tri	2.8E+07	75,000	Tri	7.8E+06	207,424	3.4E+10	0.2
Night																	
	1	14	69.3	2.6E+04	6.0E+09	207,424	Sph	5.7E+09	17,000	Tri	2.0E+08	160,000	Tri	8.0E+07	207,424	1.6E+13	4.0
	2	14	258.3	1.2E+05	3.7E+10	207,424	Exp	2.7E+10	60,000	Tri	8.0E+09	150,000	Tri	2.0E+09	207,424	5.3E+13	7.3
	3	14	255.5	5.5E+04	2.4E+10	207,424	Sph	1.2E+10	16,000	Tri	1.0E+10	190,000	Tri	3.0E+09	207,424	3.9E+13	6.3
	4	14	671.8	1.0E+06	2.9E+11	207,424	Sph	2.2E+11	19,000	Tri	4.0E+10	190,000	Tri	3.0E+10	207,424	5.7E+14	23.8
	5	14	88.8	1.9E+04	5.4E+09	207,424	Sph	4.4E+09	17,000	Tri	6.0E+08	180,000	Tri	4.0E+08	207,424	1.2E+13	3.5
	6+	14	29.3	4.3E+03	1.0E+09	207,424	Sph	8.8E+08	18,000	Tri	8.0E+07	80,000	Tri	4.0E+07	207,424	2.4E+12	1.5
Jan. 2000 Day																	
	0	18	232.8	3.3E+05	9.4E+10	266,688	Sph	4.6E+10	19,000	Exp	5.0E+10	75,000	Tri	2.0E+08	266,688	1.9E+14	13.7
	1	18	255.0	2.6E+05	8.4E+10	266,688	Sph	4.7E+10	45,000	Sph	3.6E+10	95,000	Tri	1.0E+09	266,688	7.7E+13	8.8
	2	17	130.5	8.5E+04	2.4E+10	251,872	Sph	1.9E+10	38,000	Sph	5.0E+09	130,000	Tri	1.0E+08	251,872	3.1E+13	5.6
	3	18	59.2	1.2E+04	4.0E+09	266,688	Sph	2.5E+09	38,000	Sph	1.5E+09	135,000	Tri	2.0E+07	266,688	4.3E+12	2.1
	4	18	98.5	3.4E+04	1.1E+10	266,688	Sph	9.5E+09	38,000	Sph	2.5E+09	160,000	Tri	2.0E+08	266,688	1.4E+13	3.7
	5	18	5.4	1.5E+02	4.5E+07	266,688	Sph	3.0E+07	18,000	Sph	1.5E+07	90,000	Tri	4.0E+05	266,688	8.8E+10	0.3
	6+	4	0.3	3.1E-01	-	-											
Night																	
	0	18	222.9	7.5E+04	3.3E+10	266,688	Sph	2.6E+10	98,000	Tri	5.0E+09	200,000	Tri	2.0E+09	266,688	1.6E+13	4.0
	1	18	487.3	2.0E+06	5.8E+11	266,688	Sph	3.6E+11	24,000	Sph	2.2E+11	40,000	Tri	5.0E+09	266,688	1.2E+15	34.9
	2	18	174.0	2.3E+05	6.5E+10	266,688	Sph	6.0E+10	32,000	Tri	4.0E+09	90,000	Tri	1.0E+09	266,688	9.6E+13	9.8
	3	19	95.9	4.6E+04	1.5E+10	281,504	Sph	1.2E+10	28,000	Sph	3.0E+09	140,000	Tri	4.0E+08	281,504	2.7E+13	5.2
	4	19	218.1	1.3E+05	4.7E+10	281,504	Sph	1.8E+10	16,000	Sph	2.6E+10	85,000	Tri	4.0E+09	281,504	7.3E+13	8.5
	5	19	11.8	1.2E+03	3.5E+08	281,504	Sph	3.2E+08	18,000	Tri	3.0E+07	100,000	Tri	4.0E+06	281,504	8.5E+11	0.9
	6+	6	1.7	9.7E-01	3.1E+05	88,896	Sph	1.3E+05	40,000	Tri	1.8E+05	88,896				2.7E+08	0.0

Sph: Spherical model, Exp: Exponential model, Gau: Gaussian model, Tri: Triangular model

Table 9b. Parameters of model covariograms to fit to the experimental covariogram (2)

Survey period	Time Age	No. Transect	Mean ind./line	σ^2	Experimental covariogram		Model covariogram									$\sigma^2_{Est.}$	SEM by transitive (x10 ⁶ ind.)
							Model 1			Model 2			Model 3				
					Sill	Range	Model	Sill	Range	Model	Sill	Range	Model	Sill	Range		
Jun. 2000 Day																	
	1	19	231.5	1.1E+05	4.5E+10	281,504	Sph	3.3E+10	41,000	Tri	8.0E+09	60,000	Tri	3.6E+09	281,504	5.3E+13	7.3
	2	19	142.2	1.4E+04	9.4E+09	281,504	Sph	3.6E+09	23,000	Tri	5.5E+09	260,000	Tri	4.0E+08	281,504	9.9E+12	3.1
	3	19	190.1	8.4E+04	3.3E+10	281,504	Sph	2.4E+10	42,000	Tri	5.5E+09	240,000	Tri	3.0E+09	281,504	3.5E+13	5.9
	4	19	138.4	4.3E+04	1.7E+10	281,504	Sph	1.1E+10	40,000	Tri	4.0E+09	170,000	Tri	1.4E+09	281,504	1.8E+13	4.2
	5	19	354.3	2.3E+05	9.6E+10	281,504	Sph	6.3E+10	43,000	Tri	2.3E+10	190,000	Tri	1.0E+10	281,504	9.0E+13	9.5
	6+	19	17.8	4.1E+02	2.0E+08	281,504	Sph	1.3E+08	40,000	Tri	4.6E+07	260,000	Tri	2.0E+07	281,504	2.0E+11	0.5
Night																	
	1	19	120.5	1.0E+04	6.8E+09	281,504	Sph	4.8E+09	58,000	Tri	2.0E+09	281,504				5.0E+12	2.2
	2	19	271.9	8.8E+04	4.4E+10	281,504	Sph	2.2E+10	22,000	Tri	1.8E+10	220,000	Tri	4.0E+09	281,504	5.9E+13	7.7
	3	19	204.6	1.9E+04	1.7E+10	281,504	Sph	5.4E+09	27,000	Tri	1.1E+10	266,000	Tri	1.0E+09	281,504	1.4E+13	3.7
	4	19	157.1	1.4E+04	1.1E+10	281,504	Sph	3.6E+09	38,000	Tri	4.0E+09	240,000	Tri	3.0E+09	281,504	6.4E+12	2.5
	5	19	530.7	2.3E+05	1.4E+11	281,504	Sph	5.2E+10	28,000	Tri	8.2E+10	220,000	Tri	6.0E+09	281,504	1.2E+14	11.2
	6+	18	50.8	2.0E+03	1.2E+09	266,688	Sph	4.8E+08	18,000	Tri	6.0E+08	230,000	Tri	1.0E+08	266,688	1.4E+12	1.2
Jan. 2001 Day																	
	0	19	115.5	5.5E+04	1.8E+10	281,504	Sph	1.3E+10	17,000	Sph	5.0E+09	70,000	Tri	1.0E+08	281,504	4.1E+13	6.4
	1	19	11.9	4.7E+02	1.7E+08	281,504	Sph	4.5E+07	20,000	Exp	1.2E+08	100,000	Tri	1.0E+06	281,504	2.5E+11	0.5
	2	19	10.5	6.4E+02	2.0E+08	281,504	Sph	1.8E+08	18,000	Sph	1.8E+07	120,000	Tri	5.0E+06	281,504	4.8E+11	0.7
	3	19	7.6	5.6E+02	1.7E+08	281,504	Sph	1.6E+08	17,000	Tri	4.0E+06	120,000	Tri	2.0E+06	281,504	4.4E+11	0.7
	4	19	5.3	2.5E+02	7.4E+07	281,504	Sph	6.9E+07	16,000	Sph	2.5E+06	120,000	Sph	2.5E+06	281,504	2.1E+11	0.5
	5	19	15.8	1.4E+03	4.5E+08	281,504	Sph	3.6E+08	15,000	Tri	7.0E+07	100,000	Tri	2.0E+07	281,504	1.3E+12	1.1
	6+	19	2.4	2.7E+01	8.9E+06	281,504	Sph	7.0E+06	16,000	Tri	1.2E+06	120,000	Tri	7.0E+05	281,504	2.2E+10	0.1
Night																	
	0	19	1,621.1	9.2E+06	3.2E+12	281,504	Sph	6.0E+11	48,000	Exp	2.6E+12	100,000	Tri	1.0E+10	281,504	3.6E+15	60.1
	1	19	62.6	2.6E+04	8.1E+09	281,504	Sph	3.9E+09	28,000	Sph	4.0E+09	48,000	Tri	1.5E+08	281,504	1.3E+13	3.6
	2	19	41.8	1.4E+04	4.1E+09	281,504	Sph	3.5E+09	35,000	Tri	6.0E+08	52,000	Tri	2.0E+07	281,504	5.7E+12	2.4
	3	19	19.8	2.1E+03	6.6E+08	281,504	Sph	6.3E+08	50,000	Sph	2.0E+07	150,000	Tri	1.0E+07	281,504	6.8E+11	0.8
	4	19	10.4	4.8E+02	1.6E+08	281,504	Sph	1.5E+08	54,000	Tri	9.0E+06	281,504				1.6E+11	0.4
	5	19	27.0	2.1E+03	7.5E+08	281,504	Sph	5.8E+08	48,000	Sph	1.2E+08	150,000	Tri	5.0E+07	281,504	6.8E+11	0.8
	6+	19	3.4	2.4E+01	9.6E+06	281,504	Sph	7.6E+06	45,000	Sph	2.0E+06	281,504				9.5E+09	0.1
Jun. 2001 Day																	
	1	14	6,395.6	2.7E+07	1.4E+13	207,424	Sph	5.2E+12	18,000	Tri	6.5E+12	180,000	Tri	2.0E+12	207,424	1.5E+16	123.8
	2	17	94.4	2.0E+04	7.1E+09	251,872	Sph	5.5E+09	19,000	Tri	1.2E+09	180,000	Tri	4.5E+08	251,872	1.4E+13	3.8
	3	17	167.4	3.6E+04	1.6E+10	251,872	Sph	7.1E+09	40,000	Tri	7.5E+09	165,000	Tri	1.0E+09	251,872	1.2E+13	3.5
	4	19	80.0	7.9E+03	3.9E+09	281,504	Sph	1.7E+09	42,000	Tri	1.6E+09	165,000	Tri	6.0E+08	281,504	2.8E+12	1.7
	5	17	75.9	6.5E+03	3.0E+09	251,872	Sph	1.1E+09	32,000	Sph	1.5E+09	180,000	Tri	4.0E+08	251,872	2.2E+12	1.5
	6	17	280.7	1.0E+05	4.4E+10	251,872	Sph	2.2E+10	35,000	Sph	1.1E+10	150,000	Sph	1.1E+10	251,872	3.8E+13	6.2
	7+	19	5.3	2.8E+01	1.5E+07	281,504	Sph	1.0E+07	40,000	Tri	3.1E+06	195,000	Tri	1.7E+06	281,504	1.6E+10	0.1
Night																	
	1	18	5,288.7	3.4E+07	1.6E+13	266,688	Sph	9.0E+12	22,000	Tri	5.5E+12	200,000	Tri	1.5E+12	266,688	2.4E+16	155.1
	2	17	77.4	9.5E+03	3.8E+09	251,872	Sph	2.5E+09	18,000	Tri	1.0E+09	210,000	Tri	3.0E+08	251,872	6.8E+12	2.6
	3	17	202.2	8.9E+04	3.1E+10	251,872	Sph	1.5E+10	25,000	Sph	1.1E+10	90,000	Sph	5.0E+09	251,872	4.4E+13	6.7
	4	19	96.2	1.9E+04	7.7E+09	281,504	Sph	4.8E+09	33,000	Sph	1.5E+09	100,000	Sph	1.4E+09	281,504	8.5E+12	2.9
	5	17	82.1	7.5E+03	3.5E+09	251,872	Sph	1.9E+09	32,000	Tri	8.2E+08	140,000	Tri	8.0E+08	251,872	3.2E+12	1.8
	6	17	297.7	1.2E+05	5.1E+10	251,872	Sph	3.0E+10	38,000	Tri	1.5E+10	150,000	Tri	6.0E+09	251,872	4.9E+13	7.0
	7+	19	10.6	3.9E+02	1.4E+08	281,504	Sph	1.0E+08	32,000	Tri	2.7E+07	70,000	Sph	7.0E+06	281,504	1.8E+11	0.4
Jan. 2002 Day																	
	0	17	494.9	5.5E+05	1.9E+11	251,872	Sph	1.5E+11	17,000	Gau	3.6E+10	160,000	Tri	3.0E+09	251,872	4.2E+14	20.5
	1	18	1,678.3	1.5E+07	4.5E+12	266,688	Sph	3.6E+12	18,000	Gau	9.0E+11	60,000	Tri	1.0E+10	266,688	9.7E+15	98.4
	2	14	22.3	3.9E+03	8.5E+08	207,424	Sph	1.5E+08	15,000	Exp	7.0E+08	30,000	Tri	2.0E+06	207,424	3.1E+12	1.8
	3	11	2.0	2.8E+01	4.7E+06	162,976	Sph	3.6E+06	17,000	Tri	1.1E+06	46,000	Tri	3.0E+04	162,976	1.1E+10	0.1
	4	9	0.7	4.1E+00	5.5E+05	133,344	Sph	5.5E+05	16,000	Tri	1.0E+03	133,344				1.7E+09	0.0
	5	9	0.9	6.6E+00	9.0E+05	133,344	Tri	9.0E+05	15,000	Tri	2.0E+03	133,344				2.2E+09	0.0
	6	11	1.1	7.5E+00	1.3E+06	162,976	Sph	9.5E+05	17,000	Tri	3.7E+05	46,000	Tri	1.0E+04	162,976	2.9E+09	0.1
Night																	
	0	18	866.3	6.0E+05	3.5E+11	266,688	Sph	1.2E+11	17,000	Tri	2.2E+11	205,000	Tri	1.5E+10	266,688	3.7E+14	19.3
	1	19	2,514.8	1.6E+07	6.1E+12	281,504	Sph	6.0E+12	80,000	Tri	1.0E+11	281,504				5.5E+16	234.5
	2	16	45.9	1.4E+04	3.5E+09	237,056	Sph	2.9E+09	18,000	Sph	6.5E+08	85,000	Tri	2.0E+07	237,056	7.9E+12	2.8
	3	11	6.9	2.8E+02	5.0E+07	162,976	Sph	4.1E+07	18,000	Gau	9.0E+06	50,000	Tri	2.0E+05	162,976	1.1E+11	0.3
	4	9	2.8	4.1E+01	6.0E+06	133,344	Sph	5.1E+06	17,000	Gau	9.0E+05	50,000	Tri	1.0E+04	133,344	1.4E+10	0.1
	5	9	2.6	2.8E+01	4.2E+06	133,344	Sph	3.7E+06	17,000	Gau	4.5E+05	62,000	Tri	1.0E+04	133,344	1.0E+10	0.1
	6	11	4.8	1.1E+02	2.0E+07	162,976	Sph	1.6E+07	17,000	Gau	3.5E+06	50,000	Tri	1.0E+05	162,976	4.4E+10	0.2

Sph: Spherical model, Exp: Exponential model, Gau: Gaussian model, Tri: Triangular model

Table 10. Estimators and their SEM of the stock of walleye pollock for each age group in the Doto area

[illegible]

Upper: SEM derived by transitive method
Lower: SEM derived by orthodox method ($\times 1,000,000$ ind.)

パターンでは (Fig. 61下図), 基本定線のみを用いた場合には定線による魚群分布量の変化は小さく, 定線による変動の小さい, ならかな分布パターンを示した。一方, 補助定線を追加した場合には, 定線PとQの間に設置した補助定線において突出した魚群分布のピークが観測され, また定線QとRの間の補助定線における魚群分布量が, 定線QおよびRに比べ小さな値をとるなど, 定線により魚群分布量が激しく変動する分布パターンを示した。昼夜それぞれの条件下におけるコバリオグラムを比較すると (Fig. 62), 昼間の分布情報に基づくコバリオグラムでは, 補助定線の追加によってシルの値が減少したのに対して (Fig. 62上図), 夜間のデータに基づく分布パターンでは (Fig. 62下図), 補助定線の追加によりコバリオグラムのシルが上昇し, 分散が大きくなっていることが示された。

考 察

1996年6月の調査結果を用いた定線間隔の検討では, 莫大な量の1歳魚の分布が観測された定線BおよびDを含むか否かによって, 現存量推定値およびそのSEMが大きく変動した。納沙布岬沖定線におけるスケトウダラ1歳魚の集中的な分布は, 海域全体の現存量を考えるうえで非常に重要であり, これらの魚群をきちんと捕捉できるか否かが, その後の現存量推定に大きな影響を与える。Table 11における組み合わせC: Skip every other transect (2) のように, 配置した定線が定線BおよびD上で確認された巨大な魚群分布を捉えることができなかった場合には, その結果として推定される現存量推定値は, その両方を捉えた場合の半分程度にまで減少してしまった (Fig. 57)。さらに定線間での魚群分布量の変動が小さくなることで (Fig. 58C) コバリオグラムにおけるシルも低くなり (Fig. 59C), SEMが縮小した。その結果, 巨大な魚群の分布を見逃した結果であるにもかかわらず, 現存量の推定精度が高いという誤った判断を下すことになった。第3章では初夏の道東海域におけるスケトウダラ若齢魚のパッチ的な分布が年齢組成の再構成における障害となったが, この若齢魚群のパッチ的な分布様式は, 調査定線間隔の決定においても十分に考慮すべき問題であることが本研究の結果から明らかとなった。今回の試算に用いた1996年6月の道東海域におけるスケトウダラの分布パターンを考えると, 少なくとも定線間隔を既定値の8カイリより拡大し, 高密度の魚群の捕捉の可能性を下げるような操作は, 若齢魚の現存量推定値を大きく左右する危険性が高く, 望ましくない。

補助定線の追加による調査密度の増加は, 補助定線を追加した海域内でのスケトウダラの現存量推定の精

度向上には有効性が認められた。昼間のデータに基づく襟裳岬南東沖合海域における若齢魚の現存量推定結果は, 補助定線の追加により推定値のCVが向上し, 直接的にその効果が現れた (Table 12, Fig. 60)。一方, 夜間のデータに基づく襟裳岬南東沖合海域における1, 2歳魚の現存量推定結果では, 定線の追加によるCVの向上がみられなかったが (Table 12, Fig. 60), これは補助定線の追加によって定線間での魚群分布量の変動が大きくなり (Fig. 61下図), 誤差分散が拡大したこと (Fig. 62下図) が原因である。定線間隔を細かくすることにより, 分布位置に応じた魚群分布パターンのばらつきが検出されたことは, SEMの計算においては分散を増加させ余りよい効果はもたらさないものの, 現存量推定そのものにとっては重要な意味を持つ。すなわち, 夜間調査において補助定線を追加したことにより, 基本定線だけでは捉えられなかった1歳魚の分布のピークが定線PとQの間にあることが明らかになり, 結果的に昼夜による現存量の差も若干ながら縮小した (Fig. 60)。前述したように, 道東海域におけるスケトウダラ若齢魚の分布はパッチ的な傾向が強く, それらの魚群をできる限り漏らさずに検出するためには, 定線間隔を細かくとることの効果は大きい。夜間の襟裳岬南東沖合海域における1, 2歳魚の現存量推定の場合には, 定線追加によるSEMの圧縮という効果は得られなかったものの, 8カイリ間隔の基本定線では捉えることができなかった分布のピークを捉えることができたという点において有効であったと考えるべきである。

その一方で, 定線間隔を細かくするにあたっては, 調査期間の増大をどのように吸収するかについて検討しなければならない。本研究で用いた1998年7月の道東海域における1, 2歳魚の例のように, ある特定の海域に魚群の分布が集中する様な条件下では, その海域に限って調査定線を密に設定することによって, より高精度な現存量推定を行うことは比較的容易であると思われる。しかしながら, 同時期における3, 4歳魚のように (Fig. 56), 調査海域全体に広範に分布する年齢群を対象とする場合には, 調査海域全体について定線間隔を調整する必要がある。その場合, 道東海域全域に補助定線を設定し, その全てを航走するためには, 現行の調査日数の倍の期間を要する。音響資源調査はスナップショット的な調査であり, 調査期間中の魚群の移動や移入, 移出等の影響を無視して現存量推定を行う性格上, 調査の実施に時間が掛かるのは望ましくない。調査の設計および実施にあたっては, 調査密度・精度と調査時間のトレードオフを考えつつ, 調査定線を配置し, 運用することが必要となる。また1船のみでの調査では現実的に実現が困難であるならば,

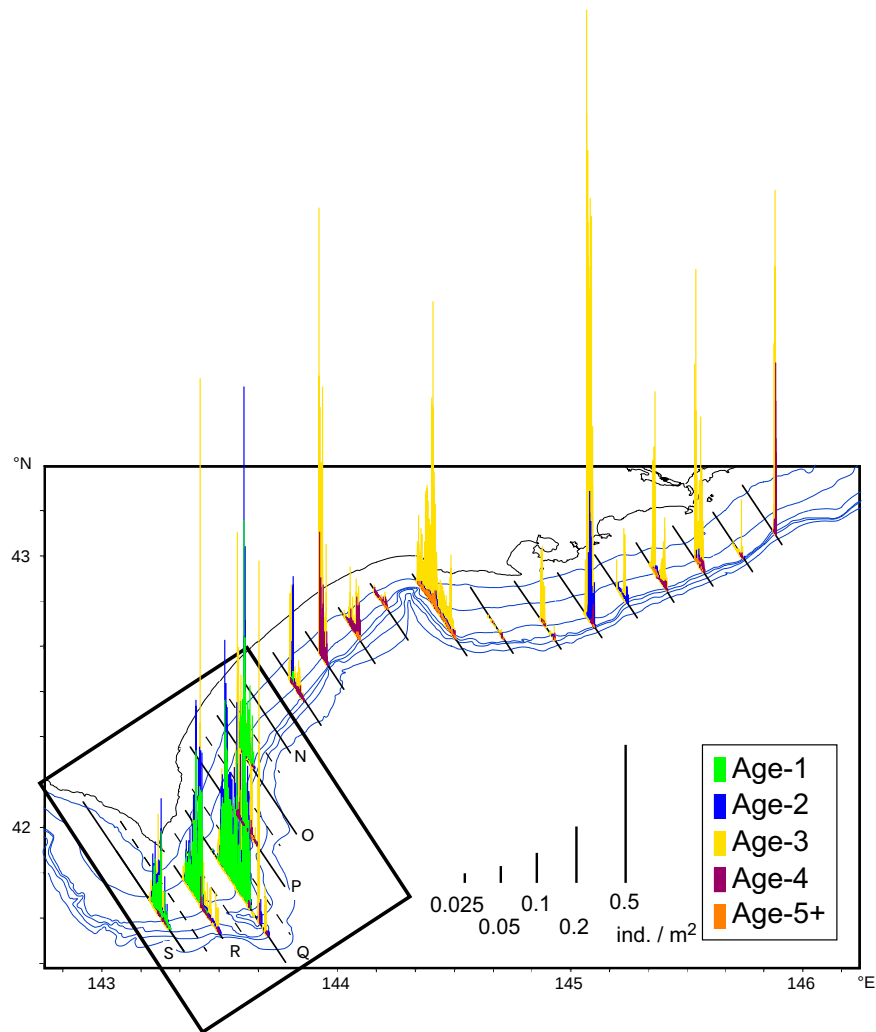


Fig. 56. Transects and the distribution pattern of walleye pollock at age in July 1998. The rectangle drawn in thick line indicates the area where the intensive track was added

Table 11. Variation of the estimated standing stock and SEM of age-1 walleye pollock in Doto, June 1996, in relation to the combination pattern of the transects

Combination pattern of the transects	Interval (nautical miles)	No. of transect	Stock (x1,000,000 ind.)	SEM (x1,000,000 ind.)	CV
A All transects	8	17	2,797	458	16%
B Skip every other transect (1: include line B&D)	16	9	4,271	813	19%
C Skip every other transect (2)	16	8	1,323	94	7%
D Skip every three transects (1: include line B)	24	6	4,389	1,374	31%
E Skip every three transects (2)	24	6	1,270	163	13%
F Skip every three transects (3: include line D)	24	5	2,731	525	19%
(G All transects, assuming mutual independence	8	17	2,797	1,033	37%)

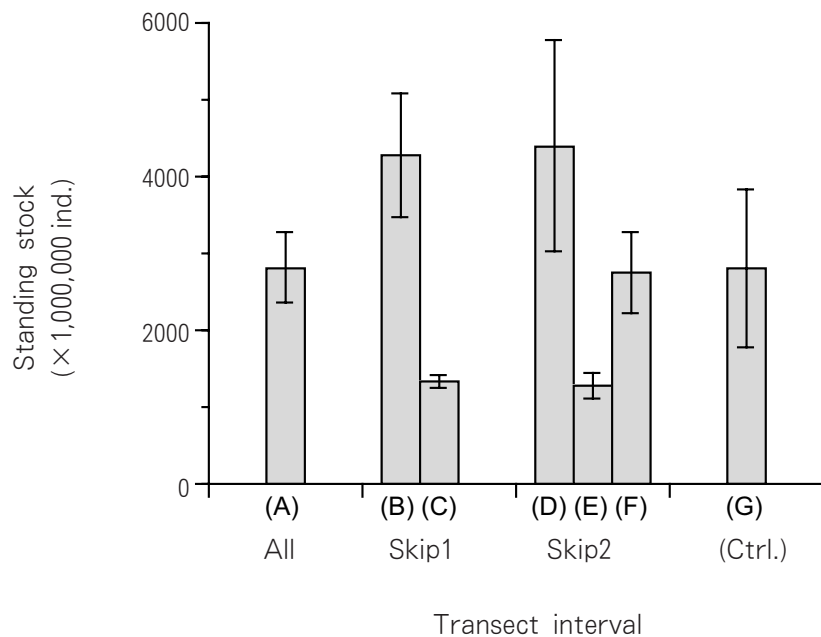


Fig. 57. Comparison of the stock estimator and SEM of age-1 walleye pollock in the Doto area, June 1996, derived by various transect interval. Letters in parentheses under the bars correspond to the transect combination in Table 11

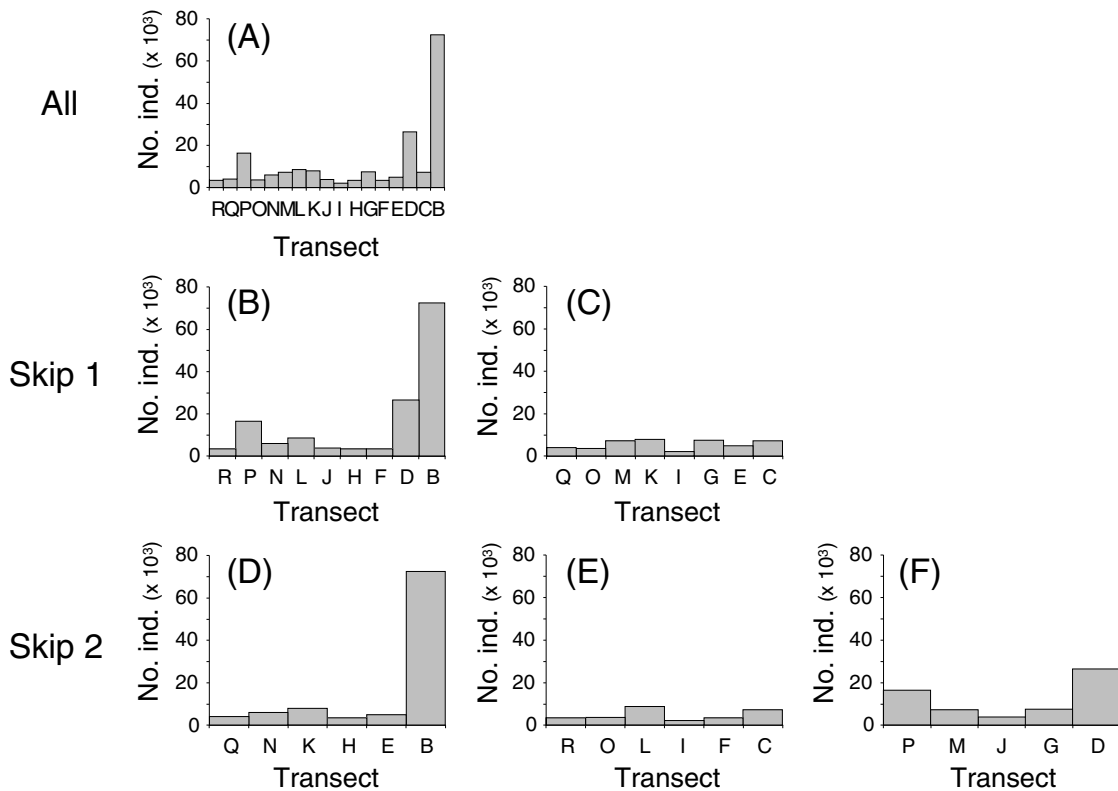


Fig. 58. Cumulated number of individuals of age-1 walleye pollock at each transect in June 1996. Letters in parentheses on the graphs correspond to the transect combination in Table 11

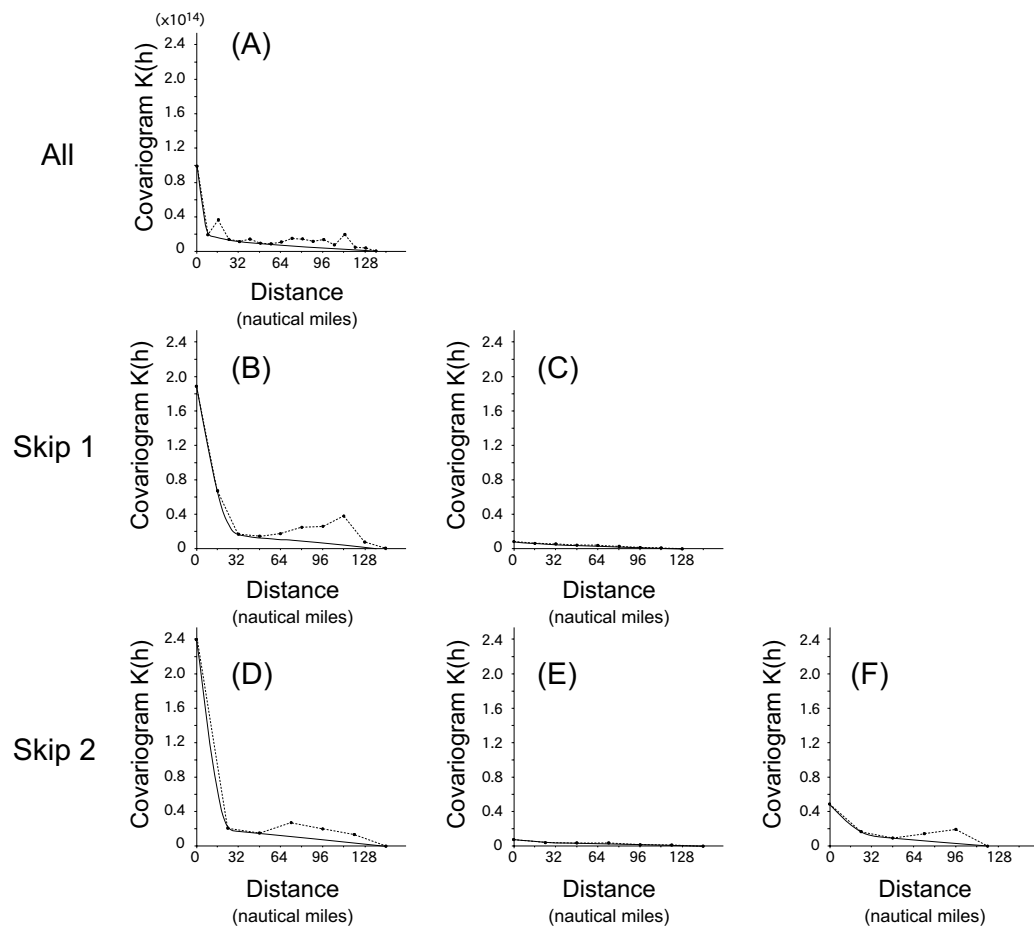


Fig. 59. Covariograms derived from the distribution of age-1 walleye pollock with three different transect intervals. Letters in parentheses on the graphs correspond to the transect combination in Table 11

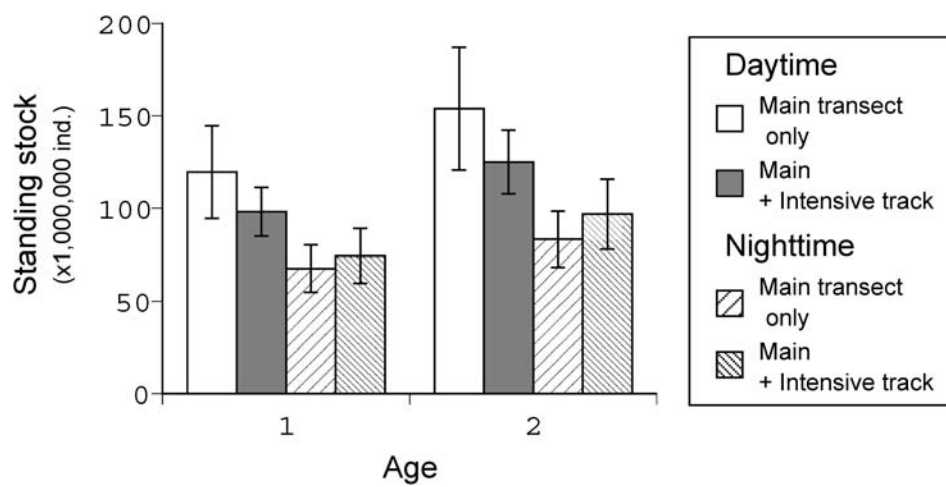


Fig. 60. Variation of the stock estimator and SEM of walleye pollock at age under the different transect interval and the time period

Table 12. Variation of the stock estimator and SEM by adding the intensive track

Age	Time period	Transect	No. of transect	Interval (nautical miles)	Stock ($\times 1,000,000$)	SEM ($\times 1,000,000$)	CV
1	Day	Main transect	5	8	119.6	25.0	21%
		+Intensive track	9	4	98.1	13.1	13%
	Night	Main transect	6	8	67.6	12.7	19%
		+Intensive track	11	4	74.4	14.8	20%
2	Day	Main transect	5	8	153.9	33.2	22%
		+Intensive track	10	4	125.0	17.2	14%
	Night	Main transect	6	8	83.4	15.1	18%
		+Intensive track	11	4	96.9	18.9	20%

複数の調査船を同時に走らせるなど、調査期間の拡大を防ぐような方策をとる工夫が必要となろう。

第5章 音響資源調査によって得られた現存量推定値の妥当性の検討

第2章および第4章において、北海道太平洋海域に分布するスケトウダラの年齢別、海域別の現存量推定値とそのSEMを求めた。しかし、音響資源調査の対象海域はスケトウダラ太平洋系群の分布域の一部でしかなく (Fig. 1, 14)、また調査を実施した季節や時間帯によって年齢別現存量推定結果が大きく異なることから、音響資源調査で得られた各々の結果が、系群全体における年級豊度を正確に反映していると判断するのは早計である。本研究の目的は、音響資源調査で、翌年以降に新規加入群として漁獲対象資源に加入する、あるいは加入したばかりの年級の豊度を推定することにより、VPAでは推定が困難な近年の若齢魚群の年級豊度の情報を補足し、その後の資源に与える新規加入群の影響を事前に見積もることにある。

一方、年齢別漁獲尾数データの時系列が十分に蓄積し、コホートがほぼ完成した条件下においてVPAによって推定される年齢別資源尾数は、1995年級が卓越年級であることなども表現され (Fig. 2)、実際の漁業の動向とも一致し、各年級の豊度を十分に反映した値と考えられる。よって、本章では、VPAから推定される年齢別資源尾数を年級豊度の指標値と仮定した上で、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の年齢別現存量推定値と、その後VPAで推定される年齢別資源尾数との間で回帰分析を行うことで、音響

資源調査によって得られる年齢別現存量推定値が、スケトウダラ太平洋系群全体での年級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。

材料と方法

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の年齢別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年齢別資源尾数の推定値を従属変数として回帰直線式を求め、両指標値の関係について検討した。使用したデータは、1996～2001年の6～7月 (計5回) および1998～2001年の1月に実施された (計4回) 音響資源調査によって得られた道東海域における年齢別現存量推定値 (昼夜) と、2001年までの年齢別漁獲尾数データの時系列を元にVPAを用いて計算した、1996～2001年の太平洋系群全体における1歳魚以上の年齢別資源尾数である (八吹, 本田, 2002)。初夏の音響資源調査結果を用いる場合には同年齢同士を、また冬季の調査結果を比較する場合には、スケトウダラの年齢の起算日の関係から*、1歳上のVPAによる年級豊度との間で回帰分析を行った。またABCの算定にあたっては、ABC設定年 (=翌年) における新規加入群 (=2歳魚) の豊度を推定することが最も重要である。このことから、回帰分析においても、同じ年齢群同士の対応以外に、初夏の音響資源調査による1歳魚の現存量推定値とVPAによる1年後の2歳魚時点における資源尾数との対応、また冬季の音響資源調査による0歳魚の現存量推定値とVPAによる1年半後の2歳魚の資源尾数との対応についても併せて検討した。VPAの結果から、調査期間内では1995年級が卓越群として現れる一方、それ

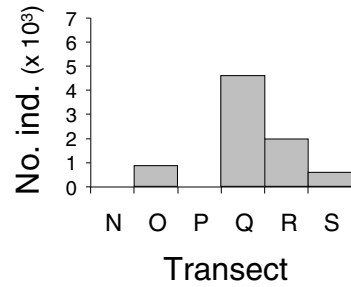
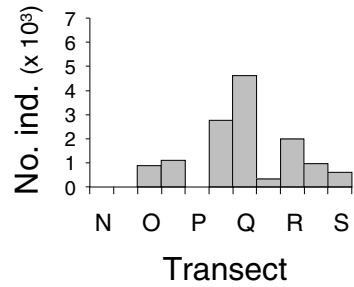
* スケトウダラ太平洋系群の年齢の起算日は4月1日に設定されており、1月の音響資源調査によって得られた年級は、3ヵ月後の同年4月には1歳加齢される。

Daytime

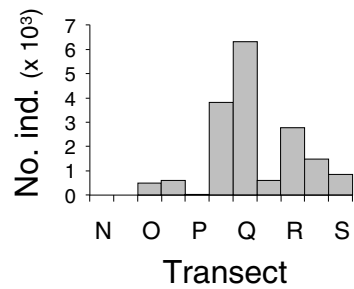
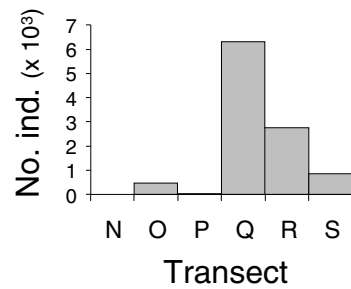
Age

Main transect

1

Main transect
+ intensive track

2

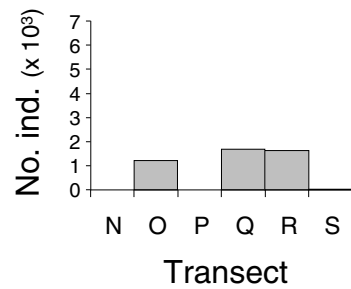
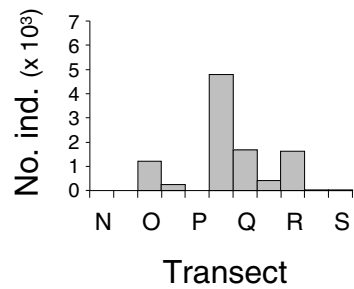


Nighttime

Age

Main transect

1

Main transect
+ intensive track

2

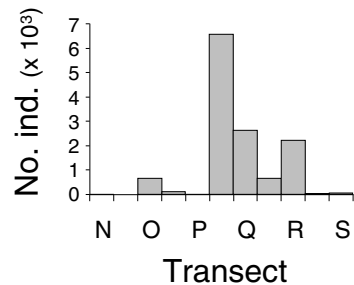
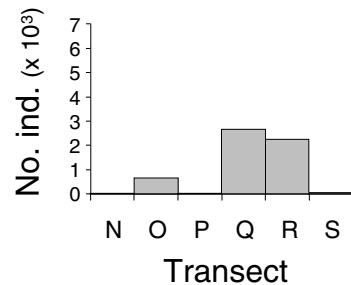


Fig. 61. Cumulated number of individuals of walleye pollock at each transect on the area SE of Cape Erimo, indicated in Fig. 56

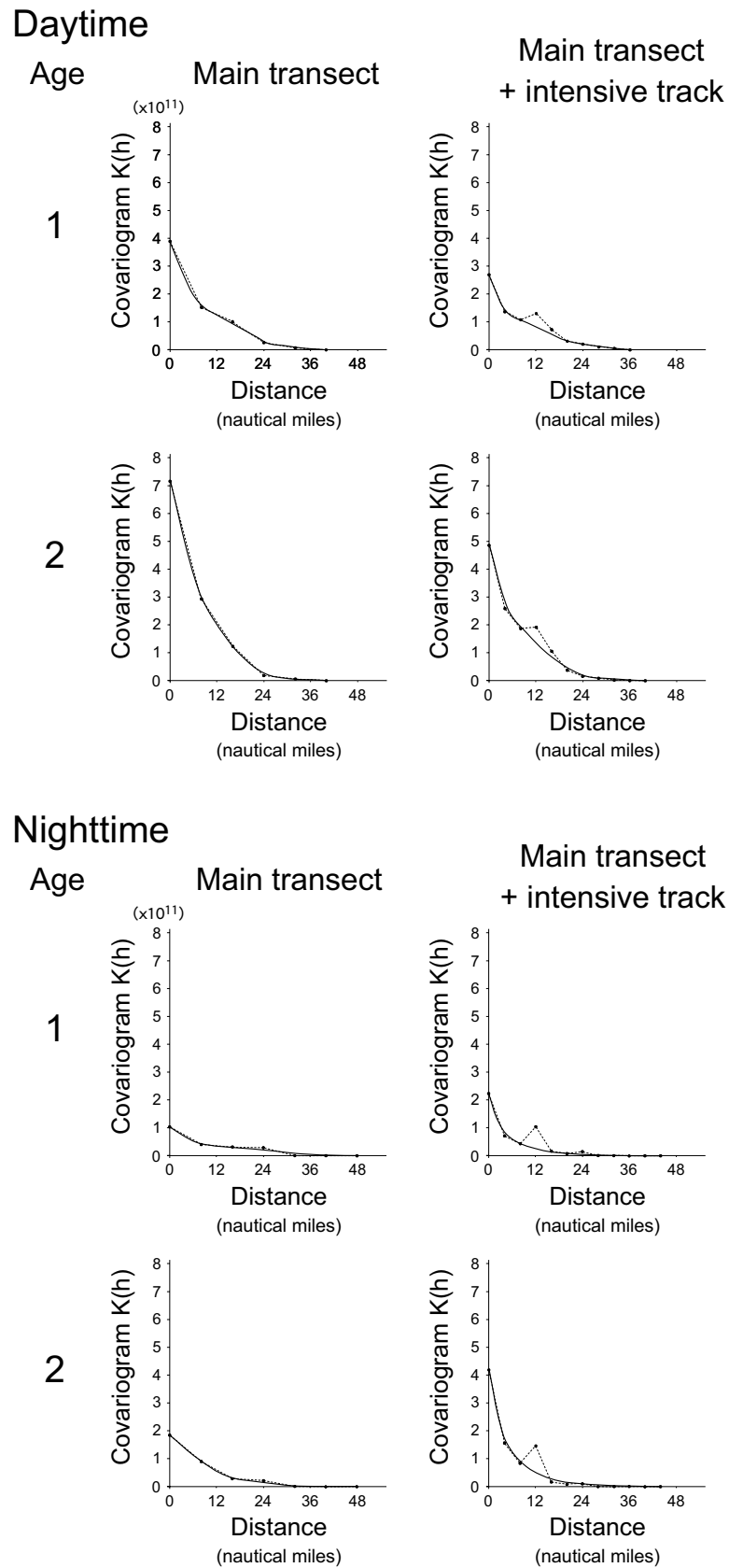


Fig. 62. Variation of the covariogram of the distribution patterns of wall-eye pollock at each age under the different conditions: Day-Night and with-without intensive track

以外の年級豊度はそれほど高くなかったことが明らかにされている (Table 13; Fig. 2)。また、音響資源調査の結果からは、1995年級と併せて2000年級も比較的高い年級豊度であったことが推定された (Table 13, Fig. 47)。そこで、1995年級および2000年級については、両年級のデータを含めた場合と除いた場合の両方について回帰分析を行った。なお、1997年夏季および1998年1月の調査における昼間のデータは欠測である。音響資源調査の結果、推定現存量が極めて少なくなる高齢魚群については、ある年齢以上の現存量推定値及びそれに対応するVPAによる推定資源尾数を全て足し合わせ、プラスグループとして扱った (Table 13)。

結 果

道東海域における初夏および冬季の音響資源調査で得られた昼夜別現存量指標値とVPAによる太平洋系群全体の年齢別資源尾数の散布図をFig. 63に示した。卓越年級である1995年級の評価については、初夏の調査においては1995年級が1歳および3歳の時点において (Fig. 63A, B)、また冬季の調査 (夜間) においては2歳の時点において (Fig. 63D)、音響資源調査による現存量推定値、VPAによる資源尾数推定値ともに非常に高い値を示した。一方、2000年級の評価については、初夏の音響資源調査では1995年級に次ぐ高豊度の年級である可能性を示したのに対して (Fig. 63A, B)、VPAによる評価では1998年級と同程度の資源量推定値に留まり、両評価法における年級豊度の評価は一致しなかった。1995年級および2000年級を除く年級の評価は、いずれの評価法においても低い値に留まり、卓越群である1995年級と同じスケールの散布図で示すと、原点付近に集中的にプロットされた (Fig. 63A, B, C, D)。

これら両資源量 (およびその指標値) の間で得られた回帰直線式をTable 14に示した。このうち、統計的に有意な回帰式については太字で示した。初夏の音響資源調査結果とVPAとの回帰においては、昼間に収録したデータの場合は、年齢群の対応が1-1歳 (2000年級を含めた場合と除いた場合の双方)、1-2歳、2-2歳および3-3歳の組み合わせにおいて、また夜間に収録したデータを用いた場合には、1-1歳 (2000年級を除いた場合)、1-2歳および3-3歳の組み合わせにおいて、有意な正の回帰式が得られた。しかし、昼間のデータに基づく2-2歳の組み合わせのケースを除いては、データセットから卓越群である1995年のデータを除くと、有意性は見られなくなった (Table 14)。冬季の音響資源調査結果とVPAとの回帰では、夜間のデータに基づく2歳魚の現存量推定値とVPAで求めた3歳魚の資

源尾数との間、および昼間のデータに基づく3歳魚の現存量推定値とVPAで推定した4歳魚の資源量との間で有意な回帰関係が見られた。しかし、これらのデータから卓越年級である1995年級のデータを除いた場合には、初夏の調査データと同様に有意性は見られなくなった。その一方で、夜間収録の音響データに基づく3歳魚の現存量と、VPAに基づく4歳魚の資源量との間では、1995年級のデータを除いた場合のみ有意な回帰関係が現れた。有意な回帰式が求められた組み合わせについては、その回帰直線をFig. 63の散布図に重ねて示した。

統計的に有意となった回帰式について、回帰直線式の95%信頼区間および年齢別資源尾数の期待値の95%信頼区間の双方を、Fig. 64およびFig. 65に示した。初夏の音響資源調査に基づくデータからVPAの資源尾数を予測する場合には、2000年級のデータを除いた1歳魚群同士 (Fig. 64B, C)、および音響資源調査によって推定された1歳魚の現存量とVPAによる2歳魚の資源尾数との間 (Fig. 64D, E) では、昼夜ともに非常に高い回帰関係があることが示された。一方、対象とする年齢が上昇するにつれて、回帰式および資源尾数の期待値の信頼区間は拡大した (Fig. 64F, G, H)。また、冬季調査の結果に基づいて求められた有意な回帰式も、初夏の調査における3歳魚以上のケースと同様に、比較的広い信頼区間を持つことが示された (Fig. 65A, B, C)。

なお、第2章で述べたように、初夏の音響資源調査によって得られる現存量推定値では、1, 2歳魚では昼間のデータに基づく現存量推定値が、また3歳魚以上的高齢魚では夜間のデータに基づく現存量推定値が、より高い値を示す傾向が見られた (Fig. 46)。しかし、VPAとの回帰分析では、1-1歳 (2000年級を除いた場合)、1-2歳および3-3歳の組み合わせにおいて、昼夜によって回帰係数の大きさに違いはみられたものの、同程度の信頼区間を持つ有意な回帰関係が得られた (Table 14, Fig. 64)。

考 察

音響資源調査を実施した時期によって、得られた現存量推定値とVPAによる資源量推定値の関係は大きく異なった。そこで、両資源量指標間の関係について、調査時期別に考察する。

1) 初夏の音響資源調査から得られる現存量推定値とVPAとの関係

3歳魚以下の年齢群において、音響資源調査によって得られる現存量推定値とVPAによって得られる年齢別資源尾数との間で有意な回帰関係が見られた (Table

14)。しかし、それらのデータから1995年級のデータを除くと、有意な回帰関係が得られないことも同時に示された（昼間のデータを用いた2歳魚の場合を除く）。これは、回帰分析に使用したデータセットにおいて、1995年級が卓越年級として極めて高い現存量推定値および資源尾数を示した一方で、1996～1999年級の年級豊度が非常に低く、独立変数および従属変数の双方において原点付近の極めて狭い範囲に集中したことに起因すると考えられた（Fig. 63）。回帰式に用いたデータのうち、1995年級のもとはいずれも1に近い高い値を示し、1995年級の存在が回帰式の傾きに大きく影響を与えていることを意味した。Fig. 64に示した回帰式のグラフにおいて、1歳魚同士（Fig. 64B, C）、あるいは1歳魚の音響資源調査による現存量推定値と2歳魚時点でのVPAによる資源尾数との対応（Fig. 64D, E）では、信頼区間が極めて狭く、高い精度の回帰式が得られている。しかし、今後調査を継続する中で、データ数が増え、また年級豊度のバリエーションが増えるにしたがって、現在得られている回帰関係に変化が生じることは十分に考えられる。

1歳魚同士あるいは音響資源調査による1歳魚の現存量とVPAによる2歳魚の資源尾数の対応において、2000年級の評価が両評価法の間で大きく異なり、他の年のデータから得られた回帰直線から外れてプロットされた（Fig. 63, 64）。音響資源調査では1歳魚時点での2000年級の道東海域における現存量が高い水準であると推定したのに対して、VPAでは、それ以前の年級と同程度の低い水準と推定した。この背景には、VPAによる資源評価の弱点である、近年の若齢魚群の年級豊度推定における精度の低さが影響した可能性が考えられる。VPAで2000年級の1歳魚時点での資源尾数を推定するために利用したデータは、2000年級が0歳および1歳魚の時点で東北海域において漁獲された際に得られた2年分の年齢別漁獲尾数の情報である。これらは、データの集計範囲が音響資源調査を実施した道東海域とは異なり、かつデータの時系列が短い。そのため、現時点で推定された2000年級の年級豊度の推定精度は低く、実際の年級豊度を反映していない可能性も考えられる。2000年級については、2002年秋の時点で道東海域における沖底の漁獲対象資源に加入し、漁獲物中にも現れはじめているものの（八吹、私信）、正式な漁獲統計が発表される2003年度にならないと、漁獲物中における2000年級の量および年齢別漁獲尾数等の値を得ることができず、現時点において2000年級の豊度について言及することは困難である。今後数年にわたって2000年級の各年齢における漁獲が行われ、VPAの計算に利用できるデータ数が蓄積されるのに伴

い、VPAによる2000年級の豊度の推定精度は徐々に向上し、年齢別資源尾数の推定値も変化するものと思われる。仮に、2000年級の1歳魚時点での豊度のプロットが、現在得られている回帰直線に近い側へ移動するならば、それは音響資源調査による新規加入群量の年級豊度推定における利点を示すことになるだろう。

2歳魚については、昼間に収録した魚探データを用いた場合には回帰関係が得られたものの、夜間のデータでは有意な回帰関係は得られなかった（Table 14, Fig. 64）。2歳魚のデータについては、1997年初夏の調査が欠測であったために1995年級のデータが含まれず、年級豊度が低いと考えられる1996～1999年級のデータのみで回帰分析を行わざるを得なかった。もし、1995年級のような卓越年級のデータが得られていたならば、1歳魚同士、あるいは音響資源調査による1歳魚現存量推定値とVPAによる2歳魚資源尾数の組み合わせと同様に、より精度の高い回帰式が得られた可能性が考えられる。

一方、3歳魚以上については、卓越年級である1995年級のデータを含みながらも、回帰直線の信頼区間は拡大し（Fig. 64G, H）、さらに4歳以上では有意な回帰式を得ることができなかった（Table 14）。また、対象とする年齢が高齢になるに伴い、回帰係数は大きくなり、回帰直線の傾きが急になった（Table 14）。これらの結果は、対象年齢が高齢になるに伴い、音響資源調査によって得られる現存量推定値とVPAによって得られる年齢別資源尾数との傾向が一致しくなくなり、かつ音響資源調査によって推定される現存量が、VPAから推定される資源尾数に対して相対的に減少することを意味する。第2章において、対象とするスケトウダラ魚群の年齢構成が高くなるに伴い、魚群が海底に着底する傾向が強まり、離底あるいは中層まで浮上しにくくなることを示した。また、このような生態的な特徴が、音響資源調査では現存量の過小推定の大きな要因となることについても考察した。対象年齢群が高齢になるに伴い、回帰係数が大きくなり、かつ回帰直線の信頼区間が拡大する、あるいは有意でなくなるといった結果は、スケトウダラ高齢魚に対する音響資源調査の有効性の限界を示すものと考えられる。

2) 冬季の音響資源調査から得られる現存量推定値

冬季の音響資源調査による現存量推定値とVPAによる資源尾数推定値との対応において（Table 14）、0-1歳あるいは1-2歳といった若齢群で有意な回帰関係が得られなかった背景には、1995年級が0歳あるいは1歳魚の時点での調査データが得られていないことの影響が考えられた。このことは、1995年級のデータを含

Table 13. Numerical abundance/standing stock at age of walleye pollock used for the regression analyses**Numerical abundance derived by VPA**

A Data set to correspond to the surveys conducted in early summer

Year	age-1	age-2	age-3	age-4	age-5	age-6
1996	3,750.6					
1997		2,544.5				
1998	402.8	436.3	1,540.1	609.3	247.8	
1999	318.2	264.3	290.8	916.8	300.8	235.5*
2000	296.1	188.7	152.7	204.5	477.5	247.8*
2001	381.7	199.5	108.2	89.3	113.5	215.0

(×1,000,000 ind.)

B Data set to correspond to the surveys conducted in winter

Year	age-1	age-2	age-3	age-4	age-5	age-6	age-7
1998	402.8	436.3	1,540.1	609.3	247.8		
1999	318.2	264.3	290.8	916.8	300.8	132.0	
2000	296.1	188.7	152.7	204.5	477.5	141.4	106.4
2001	381.7	199.5	108.2	89.3	113.5	215.0	114.4*

(×1,000,000 ind.)

Standing stock estimated by acoustic surveys

C Early summer

Daytime	age-1	age-2	age-3	age-4	age-5	age-6
Jun.1996	2,796.8					
Jul.1998	120.0	175.0	376.4	31.6	0.6	
Jun.1999	35.9	85.9	62.4	185.8	16.1	2.1*
Jun.2000	65.2	40.0	53.5	39.0	99.7	5.0*
Jun.2001	1,326.6	23.8	42.2	22.5	19.1	70.7

Nighttime	age-1	age-2	age-3	age-4	age-5	age-6
Jun.1996	1,745.5					
Jul.1998	67.9	119.7	437.8	35.4	2.0	
Jun.1999	9.7	53.6	53.0	139.4	18.4	6.1*
Jun.2000	33.9	76.5	57.6	44.2	149.4	13.5*
Jun.2001	1,410.4	19.5	50.9	27.1	20.7	75.0

(×1,000,000 ind.)

D Winter

Daytime	age-0	age-1	age-2	age-3	age-4	age-5	age-6
Jan.1999	2.6	102.3	61.6	73.7	1.8	0.1	
Jan.2000	62.1	68.0	32.9	15.8	26.3	1.4	0.0*
Jan.2001	32.5	3.3	3.0	2.1	1.5	4.5	0.7*

Nighttime	age-0	age-1	age-2	age-3	age-4	age-5	age-6
Jan.1998	12.8	156.2	1,196.5	108.9	1.4		
Jan.1999	7.7	91.5	61.2	88.8	3.7	0.0	
Jan.2000	61.0	129.9	46.4	27.0	61.4	3.3	0.2*
Jan.2001	456.3	17.6	11.8	5.6	2.9	7.6	1.0*

(×1,000,000 ind.)

Only the data of numerical abundance that corresponds to the acoustic estimators are shown.

Values marked with asterisks indicate the combined data of the older age groups.

Dominant 1995 year class are written in bold.

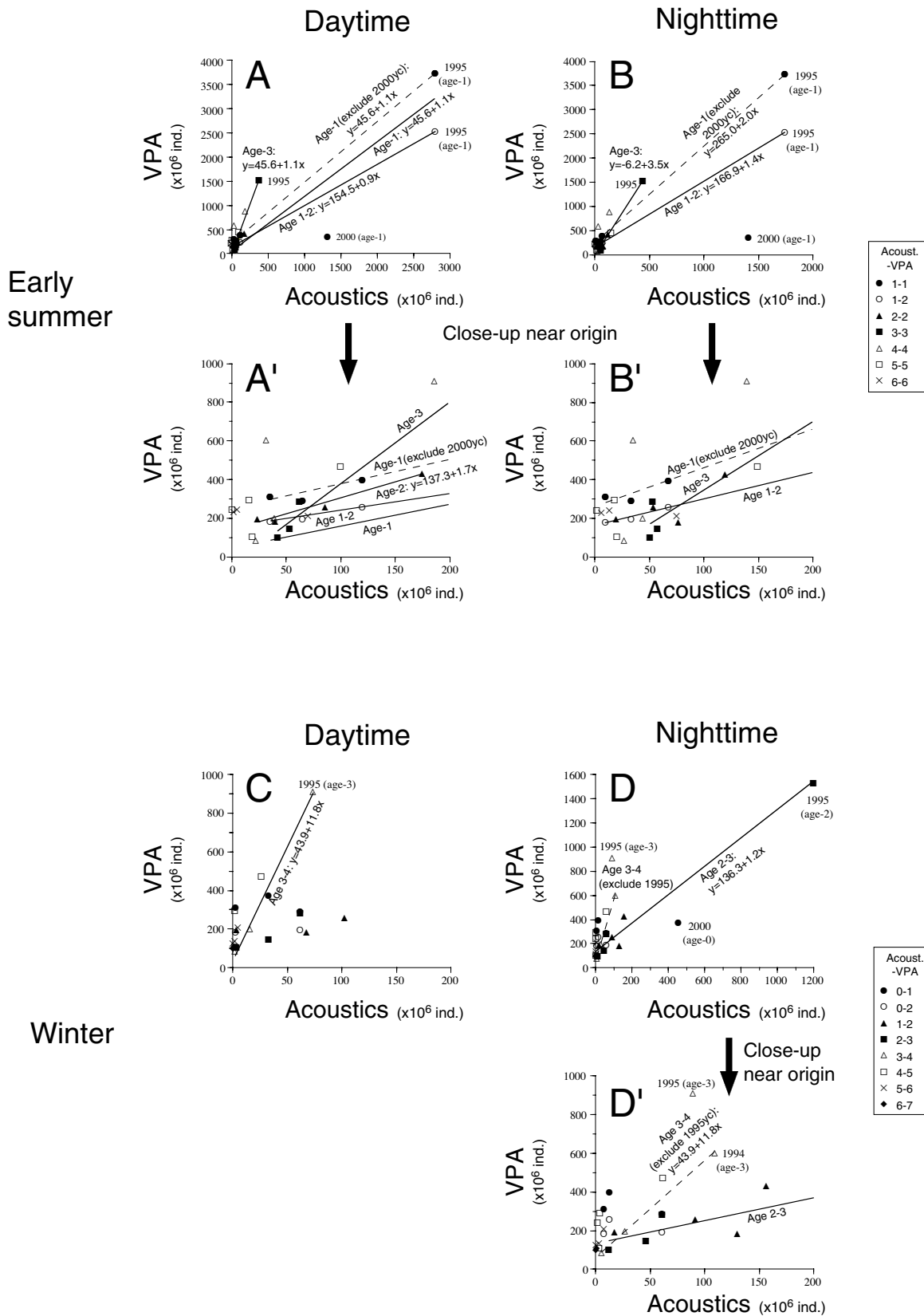


Fig. 63. Comparisons of the abundance indices of walleye pollock estimated by acoustic survey and VPA. Lines in the graphs indicate the significant regression line. Broken lines indicate the regression functions without the data of high abundant year class

Table 14. Regression functions of the numerical abundance of the Japanese Pacific population of walleye pollock against the standing stock estimated by the acoustic surveys in Doto

Survey period	Correspondence of the age group (Acoust.- VPA)	No. of Data	Regression functions		95% confidence intervals of the regression coefficients		p value
Early summer							
Daytime							
	1-1	5	y=	45.6 + 1.1 x	(0.1 ~ 2.1)		0.038
	(exclude 2000yc)	4	y=	246.8 + 1.3 x	(1.2 ~ 1.3)		0.000
	(exclude 1995 & 2000yc)	3	y=	255.9 + 1.1 x	(-7.6 ~ 9.9)		0.349
	1-2	4	y=	154.5 + 0.9 x	(0.8 ~ 0.9)		0.000
	(exclude 1995yc)	3	y=	148.6 + 0.9 x	(-1.7 ~ 3.6)		0.139
	2-2	4	y=	137.3 + 1.7 x	(0.8 ~ 2.5)		0.014
	3-3	4	y=	-38.5 + 4.2 x	(3.3 ~ 5.1)		0.002
	(exclude 1995yc)	3	y=	-280.7 + 8.8 x	(-32.9 ~ 50.5)		0.227
	4-4	4	y=	175.0 + 4.0 x	(-4.5 ~ 12.5)		0.180
	(exclude 1995yc)	3	y=	25.6 + 8.9 x	(-395.6 ~ 413.3)		0.827
	5-5	4	y=	193.2 + 2.7 x	(-3.4 ~ 8.9)		0.199
	(exclude 1995yc)	3	y=	265.6 - 3.8 x	(-117.7 ~ 110.2)		0.747
	6-6	3	y=	242.8 - 0.4 x	(-2.6 ~ 1.8)		0.268
Nighttime							
	1-1	5	y=	184.4 + 1.3 x	(-1.0 ~ 3.6)		0.166
	(exclude 2000yc)	4	y=	265.0 + 2.0 x	(1.9 ~ 2.1)		0.000
	(exclude 1995 & 2000yc)	3	y=	280.9 + 1.6 x	(-12.7 ~ 15.9)		0.397
	1-2	4	y=	166.9 + 1.4 x	(1.3 ~ 1.4)		0.000
	(exclude 1995yc)	3	y=	167.8 + 1.3 x	(-3.8 ~ 6.5)		0.187
	2-2	4	y=	127.3 + 2.2 x	(-2.9 ~ 7.2)		0.209
	3-3	4	y=	-6.2 + 3.5 x	(2.3 ~ 4.8)		0.007
	(exclude 1995yc)	3	y=	148.3 + 0.7 x	(-352.3 ~ 353.6)		0.985
	4-4	4	y=	89.8 + 5.9 x	(-6.8 ~ 18.6)		0.182
	(exclude 1995yc)	3	y=	80.2 + 6.2 x	(-391.9 ~ 404.3)		0.875
	5-5	4	y=	198.4 + 1.8 x	(-2.0 ~ 5.6)		0.177
	(exclude 1995yc)	3	y=	266.2 - 3.3 x	(-116.0 ~ 109.3)		0.772
	6-6	3	y=	244.8 - 0.4 x	(-3.0 ~ 2.2)		0.312
Winter							
Daytime							
	0-1	3	y=	343.9 - 0.4 x	(-18.8 ~ 18.0)		0.842
	(exclude 2000yc)	2	y=	319.1 - 0.4 x	(- ~ -)		
	0-2	2	y=	188.3 + 0.2 x	(- ~ -)		
	1-2	3	y=	185.8 + 0.5 x	(-7.1 ~ 8.2)		0.529
	2-3	3	y=	83.0 + 3.1 x	(-9.1 ~ 15.3)		0.191
	3-4	3	y=	43.9 + 11.8 x	(3.9 ~ 19.6)		0.033
	(exclude 1995yc)	2	y=	71.6 + 8.4 x	(- ~ -)		
	4-5	3	y=	188.3 + 11.0 x	(-71.1 ~ 93.2)		0.337
	(exclude 1995yc)	2	y=	-823.1 + 624.4 x	(- ~ -)		
	5-6	3	y=	123.3 + 19.7 x	(-27.9 ~ 67.4)		0.120
	(exclude 1995yc)	2	y=	131.3 + 7.2 x	(- ~ -)		
	6-7	2	y=	106.4 + 11.4 x	(- ~ -)		
Nighttime							
	0-1	4	y=	338.4 + 0.1 x	(-0.6 ~ 0.8)		0.642
	(exclude 2000yc)	3	y=	369.9 - 1.1 x	(-20.8 ~ 18.5)		0.596
	0-2	3	y=	228.8 - 0.4 x	(-17.3 ~ 16.4)		0.806
	1-2	4	y=	156.4 + 1.2 x	(-3.4 ~ 5.7)		0.382
	2-3	4	y=	136.3 + 1.2 x	(0.9 ~ 1.5)		0.004
	(exclude 1995yc)	3	y=	53.8 + 3.3 x	(-20.2 ~ 26.8)		0.328
	3-4	4	y=	65.6 + 6.8 x	(-4.7 ~ 18.2)		0.126
	(exclude 1995yc)	3	y=	64.8 + 5.0 x	(4.1 ~ 6.0)		0.010
	4-5	4	y=	208.9 + 4.4 x	(-3.8 ~ 12.5)		0.147
	(exclude 1995yc)	3	y=	197.8 + 8.6 x	(-1,036.5 ~ 1,053.6)		0.934
	5-6	3	y=	121.9 + 11.5 x	(-43.0 ~ 65.9)		0.228
	(exclude 1995yc)	2	y=	132.0 + 2.9 x	(- ~ -)		
	6-7	2	y=	104.4 + 9.9 x	(- ~ -)		

The functions written in bold are statistically significant.

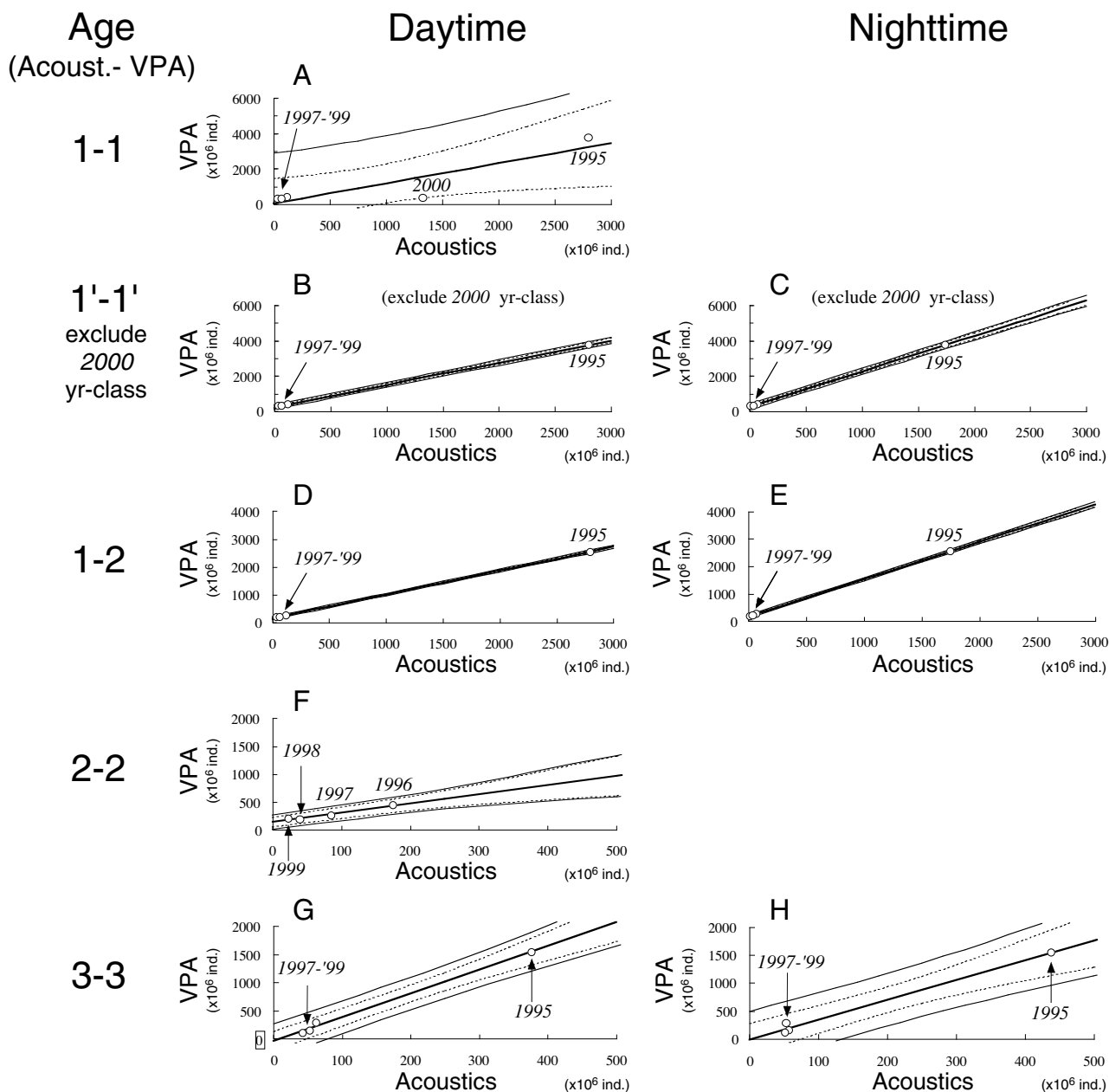


Fig. 64. Correspondence of the estimator of the standing stock at age of walleye pollock in the Doto area derived from the acoustic surveys conducted in June and the numerical abundance at age of pollock in the whole stock by VPA. Thick line indicates regression line; paired broken curves indicate 95% confidence interval of the regression coefficient; paired solid curves indicate 95% confidence interval of the distribution of the estimators. *Italic* values indicate the year class of the data

む 2 歳の現存量（夜間）と 3 歳の資源尾数との間で、有意な回帰式が得られたことから想像される (Fig. 65A)。逆に言えば、冬季の音響資源調査に基づく現存量推定値と VPA による資源尾数との関係が有意になるか否かも、若齢魚群については 6 月の調査と同様に 1995 年級の卓越群のデータを含むか否かのみによって決定された可能性が高い（夜間のデータに基づく 3-4 歳の関係を除く）。

一方、夏季の調査およびその後の漁況の推移から高豊度の年級であったと推定された 2000 年級については、2001 年 1 月の夜間のデータから計算された 0 歳魚の現存量推定値は 4 億 5,630 万尾で、1999 年以前の低い豊度の年級で推定された現存量推定値である 770~6,100 万尾に比べて一桁高い値を示した (Table 13, Fig. 63D)。前述のように、VPA では 2000 年級の豊度を正確に評価できていない可能性もあり、今後 VPA による 2000 年級

の豊度の評価がどのように変化していくかに注目しつつ、冬季調査における卓越年級の発生を検出する可能性についても引き続き検討する必要がある。

冬季現存量調査における夜間収録の音響データに基づく3歳魚の現存量と、VPAに基づく4歳魚の資源尾数との間では、他の例とは逆に1995年級のデータを除いた場合のみ有意な回帰関係が現れた (Fig. 65C)。この原因は、冬季の音響資源調査における3歳魚時点での1994年級の推定現存量 (1億890万尾) が1995年級の3歳時点での推定現存量 (8,880万尾) よりも多く、VPAによる4歳魚時点での両年級豊度の推定結果 (1994年級: 6億930万尾; 1995年級: 9億1,680万尾) と逆転したために生じたことによる (Table 13, Fig. 63 D')。VPAによる推定結果では、1994年級の豊度は1993年級以前あるいは1996~1999年級に比べれば高かったものの、1995年級に比べればいずれの年齢においても低い豊度であったと推定されており (Table 13), 1月の夜間の音響資源調査では、3歳の冬の時点での1994年級と1995年級の大小関係を判別できなかったことが考えられる。同じ年齢群の対応でも、昼間のデータを用いた場合には、1995年級を含む形で回帰関係が得られたが (Table 14, Fig. 65B), こちらのデータセットには1998年1月の調査結果が欠測しているために、

1994年級のデータが含まれていないことが影響したことも考えられる。6月の調査においても、4歳魚以上の高齡魚では音響資源調査結果とVPAの結果との間で有意な回帰が見られず、量的な判断が難しいことが示された。また、同様に1月の音響資源調査においても、3歳魚以上の高齡魚については、音響資源調査の調査結果から年級豊度を推定することは困難と判断された。

3) 音響資源調査によって得られた現存量推定値とVPAによって得られた資源尾数推定値との回帰関係の精度

本研究における目標は、翌年以降に新規加入群として漁獲資源対象に加入する若齡魚群の年級の豊度を音響資源調査により事前に把握することにあった。初夏の調査では、1, 2歳魚において両資源量指数の間に有意な回帰関係が得られ、道東海域における音響資源調査によって得られる若齡魚の現存量推定値が、系群全体の年級豊度を反映する可能性が示された。その一方で、冬季調査によって得られる現存量推定値からは、0~2歳魚の若齡魚においては、VPAによる年級豊度評価結果との間で良い回帰関係を得ることはできなかった。しかし、夏冬両方の音響資源調査の結果から高い豊度が予想される2000年級については、0歳魚の冬季

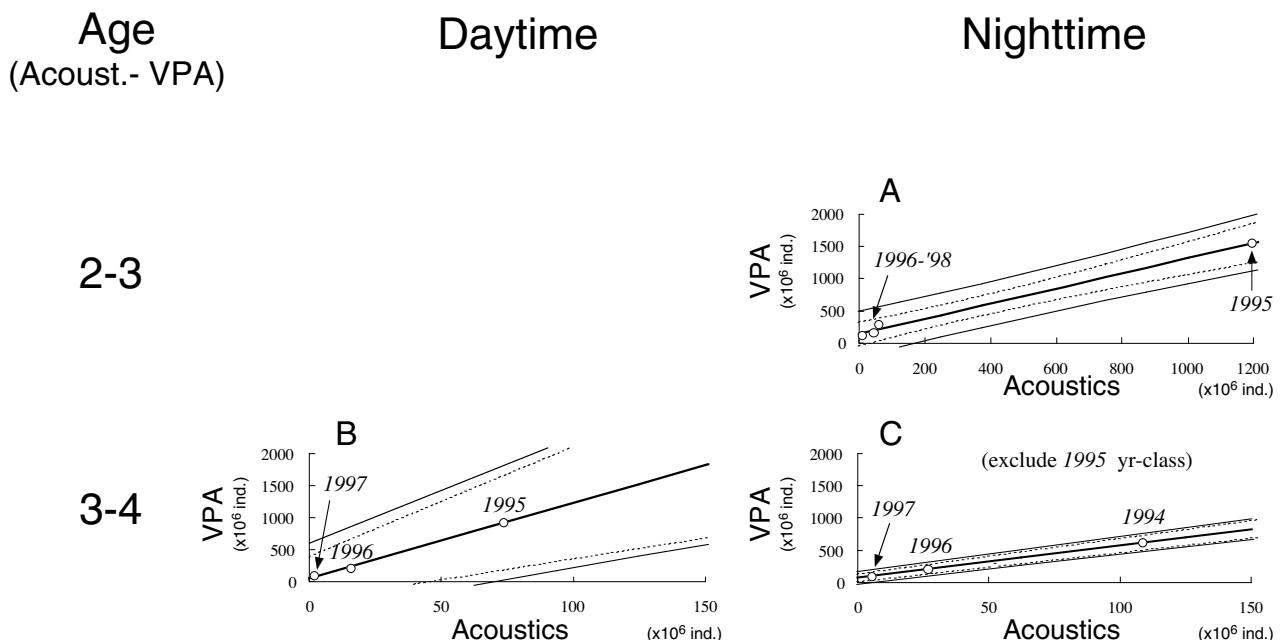


Fig. 65. Correspondence of the estimator of the standing stock at age of walleye pollock in the Doto area derived from the acoustic surveys conducted in January and the numerical abundance at age of pollock in the whole stock by VPA. Thick line indicates regression line; paired broken curves indicate 95% confidence interval of the regression coefficient; paired solid curves indicate 95% confidence interval of the distribution of the estimators. *Italic* values indicate the year class of the data

の時点で既に高い値を示しており (Table 6), 今後VPAによる2000年級の年級豊度が確定されれば, 冬季の音響資源調査でも高豊度の新規加入群の発生を検出できる可能性がある。資源評価上, あるいは漁業管理上, 卓越年級の発生予測を半年遡って行うことに価値が見いだされるならば, 冬季の音響資源調査も, 年級豊度の細かな水準を見るだけの精度は低くとも, 卓越年級の発生をモニターする意味では有効であるといえよう。

また, 現時点で非常に精度の高い回帰式が得られている初夏の音響資源調査結果についても (Fig. 64B, C, D, E), 高豊度の1995年級のプロットと, それ以外の低豊度の年級のプロットの間にはデータが存在せず, 事実上1995年級のプロットによって回帰式が決定されている。このことを考慮すると, 現在得られている回帰式をもって, これまでデータの得られていない範囲の豊度の年級についてもFig. 64のグラフに示したような高精度の信頼区間で年級豊度の予測ができるかどうかについては, もう少しデータが蓄積されるまでの間は控えめに扱うべきであろう。しかしながら, 年級豊度のバリエーションに乏しいこれまでのデータについても, 卓越年級であった1995年級および低水準であった1996~1999年級の豊度の水準が, 音響資源調査による現存量推定値とその後得られたVPAによる資源尾数の両方において同様の結果として評価されたことは, 翌年の新規加入群の規模が卓越年級水準であるか低い年級豊度であるかを判断する程度であれば, 音響資源調査で得られる若齢魚の現存量推定結果は有効な判断基準となりうることを示していると考えられる。このことは, 翌年度の新規加入群量がその後のABC算定に大きな影響を与える資源評価業務においては, 非常に有効な予測手段であると言えることができよう。

4) 道東海域以外の海域に分布する魚群量の扱い

本研究では, 夏季の道東海域における若齢魚の現存量推定値と, VPAによって推定される資源尾数の推定値との間で回帰分析を行い, 6月の調査における若齢魚群の現存量推定値がVPAの結果と有意な回帰を示すことを明らかにした。これによって, 音響資源調査による現存量推定値が, 年級豊度の指標値として有効であると考察した。しかし, 第2章で示したように, 調査範囲を日高湾まで拡大した2000年6月の調査では, 道東海域に分布するのと同程度の量の1, 2歳魚が, 東部日高湾沿岸域に分布することが示された (Table 5, Fig. 27)。同年の1歳魚および2歳魚は, それぞれ1999年級と1998年級に相当するが, これらの年級豊度は, VPAによる資源尾数推定では1歳時点で3.0億尾,

3.2億尾とそれほど高くないものと想定されている (Table 13)。また, 音響資源調査で推定された現存量も低い値に留まり (Table 5, 6), 音響資源調査およびVPAの双方において年級豊度は低いと推定されている (Table 13)。そのため, 仮に道東海域のみの現存量推定値を用い, 日高湾に分布する魚群量を無視することで年級豊度を過小推定したとしても, 1995年級の卓越年級の存在によって回帰係数のほとんどが決まっている回帰直線式に与える影響は小さかったとも考えられる。日高湾を調査海域に含めてからの年数が短く, 十分なデータ数が得られていないため, 本研究における回帰分析では日高湾海域における現存量推定値は考慮に加えなかった。しかし, 今後日高湾海域における年齢別現存量のデータが揃った時点において, 道東海域のみの現存量推定値と北海道太平洋岸全域における現存量推定のどちらがVPAによる太平洋系群の年齢別資源量推定値との間で良い相関を示すかについて, 改めて検討する必要がある。

第6章 総合考察

本研究では, 北海道太平洋海域に分布するスケトウダラ若齢魚を対象とした音響資源調査の設計および実施に係る技術的・外的な条件, 調査対象となるスケトウダラ若齢魚の分布生態および得られた現存量推定値の妥当性について検討をおこなった。本章では, それらの結果をまとめ, 適切な音響資源調査の設計および実施のために考慮すべき調査条件と, スケトウダラ若齢魚群の生態における特徴および現存量推定結果の解釈に分けて整理するとともに, 今後音響資源調査によるスケトウダラの現存量推定法を発展させていく上で検討すべき課題について抽出する。

6.1 音響資源調査の最適設計のために考慮すべき要因

対象生物の分布を正確に反映する音響資源調査を実施するためには, 調査の実施および精度に関わる様々な要因について適切な調整を行い, また調査条件を選択する必要がある。第1章では, 調査の設計, 実施にあたっての技術的あるいは外的な要因についての考察を行った。本調査で使用した調査船第三開洋丸においては, 船首側から風波を受けて航走する際に, 船速に応じて最大1.3dB程度の航走減衰が発生する一方, 船尾側から風波を受けて航走する際には, 船速に関わらず航走減衰が発生しない特徴を持つことが明らかになった。この結果を受け, 本船を用いて音響資源調査を行う際には, 現場での風波の方向に応じて航走方向を臨

機応変に変更し、できる限り風波を船尾側から受けるかたちで航走し、航走減衰による現存量の過小推定の危険性を減ずるよう、調査設計に反映させた。調査実施にあたっての外的な要因の一つ目としては調査海域における気象状況を取り上げ、北海道太平洋沿岸における風速の月別変化から、6～8月頃が最も風が弱くなる時期で、船の航行および音響資源調査にとって好適な条件であることを示した。外的要因の二つ目には、漁業活動との衝突を取り上げた。春～夏季の北海道太平洋海域で操業されるサケマス流し網は、調査船の定線航走そのものを不可能にする場合がある。特に、調査海域と操業海域の重複が予想される道東海域東端の海域においては、サケマス流し網の操業数が減少する漁期終盤に合わせて調査期間を設定するのが適当であると判断された。また、沿岸の敷設漁具は漁獲試験の際の障害となるが、これらは冬期間に敷設数が増加することから、冬季の調査では漁獲試験の回数や海域が制限されるなどの影響が予想され、実際の調査においてもその通りの結果となった。本研究で扱った音響資源調査の目的は現存量推定結果を資源評価に反映させることにあり、調査の実施時期は現行の資源評価のスケジュールに間に合うように設定されなければならない。これら調査の実施時期の設定にあたり影響を与える要因について検討した結果、現状では6～7月の初夏の時期が、最も好適な条件で調査ができる時期と考えられた (Fig. 13)。

第2章では、スケトウダラ魚群の年齢別の分布位置・水深帯、季節および時間帯による現存量推定値の変化、および混在する他の魚種の影響について考察した。スケトウダラ若齢魚は初夏および冬季のいずれにおいても襟裳岬周辺から釧路沖にかけての陸棚域を中心に分布したが、調査海域を道東海域から日高湾海域まで拡大した2000年6月の調査において、日高湾沿岸域で道東海域の6割～同程度の規模の若齢魚の分布が確認され、今後は道東海域以外の海域に分布する若齢魚の分布についても考慮する必要が示された。また、同一海域を対象に1カ月程度時期をずらして連続的に実施した調査の結果、スケトウダラ0歳魚の日高湾から道東海域への移入過程と考えられる分布の変化が捉えられた。この結果から、北海道太平洋岸に分布するスケトウダラ0歳魚にとっては、6～7月頃は日高湾から道東へ向けての移動の盛んな時期にあたることが予想され、現存量推定の対象として初夏の0歳魚を含めるのは不適当であると考えられた。

スケトウダラと混在して現存量推定の障害となりうる魚種として、夏から秋にかけて北海道太平洋海域に來遊するカタクチイワシの存在が挙げられた。特に、

夜間に表層付近で分散して分布する際にはスケトウダラ若齢魚群との分離が困難になることが予想され、カタクチイワシが分布する時期を外して調査を行うことが望ましいと考えられた。

第3章では、スケトウダラ魚群の分布環境から、その魚群における年齢組成および年齢別尾叉長組成を推定し、それにしたがって魚群反応を各年齢群に分解することを試みた。その結果、魚群反応の年齢分解にあたって重要なパラメタの一つである年齢別の平均尾叉長や平均TSについては、魚群反応の分布海域および水深からはほぼ再現することができた。しかし、もう一つの重要なパラメタである年齢組成比については、2～4歳魚については魚群反応の分布海域および水深からある程度実際の漁獲試験と同様の結果を再現することができたものの、資源評価上最も重要な1歳魚の分布については、そのパッチ的な分布様式を再現することは困難であった。現状においては、調査努力量を要するものの、個々の魚群反応に対してできる限り多くの漁獲試験を行い、実際に年齢組成を確認した上で、その結果をその魚群反応の年齢分解に用いる方法が最も確実かつ唯一の方法であると考えられた。

第4章では、空間統計学を用いて音響資源調査で得られた現存量推定値のSEMを求めるとともに、適切な航走定線間隔の探索のための試算および実験を行った。空間統計学と従来の統計手法の違いは、平均値の推定にあたり、データ間の空間自己相関を考慮するかしないかの違いで、いずれの方法を用いても、平均値のものには変化はなく、そのSEMのみが方法によって変化する。データ間に空間自己相関が全く存在しなければ両手法によるSEMは一致するが、データ間に自己相関が存在する場合には、それを考慮する空間統計学によって求まるSEMは、データ間の自己相関が無いと仮定する従来の統計手法によって推定されるSEMに比べて小さくなる。道東海域に分布するスケトウダラの年齢別現存量推定値に、空間統計学を適用することによって得られた現存量のSEMは、従来の統計手法によって得られるSEMの1/2～1/15まで狭まった (Table 10)。この結果から、本研究で扱った道東海域におけるスケトウダラの分布には空間自己相関があり、その現存量推定に際しては、空間統計学の適用が有効であることが示された。また、定線間隔を変化させて現存量およびそのSEMを計算した結果、現行の定線間隔である8マイルよりもさらに間隔を狭めることにより、現存量推定の精度がより向上することが示された。しかし、定線間隔を密にすることは調査時間の延長につながり、音響資源調査におけるスナップショット性およびシップライムの確保の面から、現状の調査体制では今以上

の調査努力量の増加は困難と考えられた。

第5章の解析では、音響資源調査によって推定した6月の道東海域に分布するスケトウダラ若齢魚の現存量とVPAによって推定されたスケトウダラ太平洋系群の年齢別資源尾数との間に有意な回帰関係がみられ、現段階では初夏の道東海域における音響資源調査で得られる1歳魚の現存量推定値が、翌年に資源に加入する若齢魚の年級豊度を予測するうえで有効であると判断された。

6.2 スケトウダラ若齢魚群の分布生態および現存量推定結果についての考察

本研究の結果、北海道太平洋海域におけるスケトウダラの分布に関する多くの知見が得られた。特にスケトウダラ魚群の日周鉛直移動は、いずれの年齢群および季節においても観察され、その範囲および程度が季節や年齢によって変化し、昼夜および季節による現存量推定結果の違いとなって現れた。昼夜による若齢魚の年齢別現存量推定値 (Fig. 46) は、6月の調査では昼間のデータに基づく値が、また7～8月および12～1月の調査では夜間のデータに基づく値がより高い値を示す傾向が見られた。特に、2001年1月および7月、2002年1月の調査では、音響資源調査の結果から高豊度の年級である可能性が示唆される2000年級の評価が昼夜で大きく異なり、昼間のデータに基づく現存量推定値では、年級豊度の高さを正確に表現できない可能性が示された。

調査時期の違いによる同一年級の現存量推定結果の変動は、昼夜による差以上に大きな差として現れた。各調査によって得られた道東海域における年齢別の現存量推定値を、同一年級における現存量推定値の変化として並べた結果 (Fig. 47)、6月の調査と1月の調査では、同じ年級の現存量が2倍程度変動し、毎冬の調査で減少し、毎初夏の調査で再び増加するジグザグの変化を示した。冬季調査時に現存量推定値が大きく減少する原因としては、魚群の調査海域外への逸散、日周鉛直移動の変化に起因する海底デッドゾーンの影響の増大、航走減衰の増加による過小推定などが考えられたが、現時点ではその原因と影響の程度を特定するには至らなかった。

VPAによるスケトウダラ太平洋系群の年級豊度との回帰分析から、6月に実施した音響資源調査によって得られる年齢別現存量は、1, 2歳魚の若齢魚においてはVPAによる結果と有意な回帰関係を示し、年級による豊度の評価が両手法間で一致したのに対して、4歳魚以上については有意な回帰関係が得られなかった。

コホートが完成した時点におけるVPAによる年級豊度推定結果を基本とすれば、初夏の音響資源調査における現存量推定の有効年齢は1～2歳付近にとどまり、4歳魚以上の高齢魚については、その年級豊度を道東海域における音響資源調査で表すことは現状では困難と考えられた。ただし、1, 2歳魚の評価において有意な回帰関係が得られた理由は、1995年級の豊度がいずれの方法においても非常に高く評価され、その他の年級と大きく離れた位置にプロットされたことの影響が大きい (Fig. 64)。今後データの蓄積が進み、データ数が増え、かつプロット範囲が広がることにより、より一般的な形での回帰関係となることが期待される。なお、年齢別現存量推定値は昼夜それぞれの調査について推定されるが、そのいずれについてもVPAとの間ではほぼ同様の回帰関係を示した。

一方、1月の音響資源調査で得られた年齢別現存量推定値とVPAによる年齢別資源尾数との間では、2歳魚以上については有意な回帰関係が見られたものの、調査の主たる目的である0, 1歳の若齢魚については、有意な関係を見いだすことができなかった。しかし、こちらは初夏の調査とは逆に、音響資源調査では高豊度と推定された2000年級に対するVPAによる年級豊度の評価が低いことの影響が考えられることから、現在の結果のみから冬季における音響資源調査の結果が年級豊度を反映しないと結論づけるべきではない。今後VPAによる2000年級の評価が定まった時点で、冬季調査における2000年級の評価および冬季調査の有効性について再度検討する必要がある。

6.3 音響資源調査によるスケトウダラ現存量推定の今後の展開と課題

本研究の結果、音響資源調査によって求められた道東海域における若齢魚の現存量推定値と、その数年後にVPAによって推定されたスケトウダラ太平洋系群における年齢別資源尾数との間に有意な正の回帰式が得られ、音響資源調査の結果から翌年の新規加入群の規模が予測可能であることが示された。この回帰分析の実施にあたり、音響資源調査によって得られた現存量推定値は、VPAによって得られた資源尾数推定値を基準とした相対値として扱った。このことは、初夏の調査によって求められた1歳魚の現存量推定値が昼夜によって異なるにもかかわらず、VPAによって得られた年齢別資源尾数との間ではそれぞれ別な回帰式が当てはまり、結果的に昼夜どちらの現存量推定値を用いても翌年の資源尾数が予測可能であると判断した結果にも通じる。

しかし、今後のスケトウダラ資源研究あるいは海域生態系を対象とした研究の展開を考えた場合、その場に分布するスケトウダラの年齢別の絶対量を把握することの重要性は、今以上に大きくなることが予想される。そのような期待に応えるためには、以下に挙げる個々の誤差要因についてさらなる検討を行い、調査の結果得られた現存量推定値が、真の分布量に対してどの程度の誤差や偏りが想定されるのかについて、詳細な検討と判断を行う必要がある。

1) スケトウダラ若齢魚の平均TSについて

現在スケトウダラのTS推定に用いている体長-TS関係式は、もともと体長30~40cmの大型個体において求められたものである。本研究では、それをより小さな個体に対して外挿する形で若齢魚における平均TSを求めているが、そのような外挿によるTSが真のTSとして有効かどうかの検証は行われていない。また、本研究では解析には用いなかったものの、初夏の調査では日高湾海域において体長5~10cm程度のスケトウダラ0歳魚群の分布も音響資源調査によって捉えられている (Fig. 27, 29)。このように、体長の小さなスケトウダラ幼魚においては、魚のTSの大部分を決定する鰭 (Foote, 1980) と尾叉長との関係が、体長30~40cmの未成魚あるいは成魚とは異なることが考えられる。また鰭のサイズが小さくなることで、サイズと音波長の比である L/λ が共振領域に近づくことの影響なども考えられ (古澤, 1990)、成魚における体長とTSの関係が大きく外挿して幼魚のTSを求めるのは適切とはいえない。今後、0歳魚時点での現存量推定を行うにあたっては、スケトウダラ幼魚における平均TSの算出法を新たに検討することが求められる。

2) 昼夜あるいは季節による現存量推定値の変動について

各調査によって得られた年齢別現存量推定値は、その季節や時間帯により変動した。本研究では、初夏の調査と冬季の調査、またそれぞれの季節における昼間の調査と夜間の調査を別々に取り扱い、それぞれについてVPAによる資源量推定値との回帰分析を行ったため、現存量推定値の時間帯あるいは季節による変動の要因について詳細な考察は行わなかった。しかし、今後音響資源調査によって得られた年齢別現存量の経時的、経年的な変化を用いて解析を行うような場合には、なぜ時間帯や季節によって推定現存量に差が生じたのかについて、より詳細な解析が必要となる。大西洋タラ (*Gadus morhua*) においては、昼夜による平均TSの明確な変化が観察されている (MacLennan and

Simmonds, 1992)。一方、北海道西部日本海に分布するスケトウダラを対象として実施された*in situ* TS測定では、昼夜による平均TSの変化は観察されなかった (安部ら, 1999)。同様の調査を、本研究と並行する形で道東海域においても実施し、昼夜による平均TSの変化を求める試みを行ったものの、現時点では結論に至っていない (安部ら, 未発表)。また昼夜による現存量推定値の変動要因としては、平均TSの変動以外にも、表層あるいは海底のデッドゾーンに魚群が分布することによる過小推定の影響も考えられる。本研究の結果から、昼間に海底付近で魚群を形成し、夜間に分散して海底付近から浮上するスケトウダラ魚群の日周行動が観察された。この鉛直移動によって魚群が海底あるいは表層のデッドゾーンに入ることにより、時間帯や季節あるいは年齢による現存量推定値の変動が生じている可能性も考えられる。しかし、昼間に海底近くに分布し、夜間浮上する日周鉛直移動のパターンは、一般的な記述としては正しいものの、季節や海域によっては、必ずしも日出没を境に日周鉛直移動を繰り返しているとは限らない (Shida, 2001)。スケトウダラ若齢魚群の日周鉛直移動の解明のためには、個体の成長ステージ、現場の水温、餌生物の分布など、スケトウダラの生態に関する研究をすすめていく必要があろう。

3) 魚群反応における魚種およびサイズ組成の確認について

本研究では、魚群反応の年齢分解にトロールによる試験操業の結果を用いた。第2章および第3章で述べたように、道東陸棚域におけるスケトウダラ若齢魚はパッチ的に分布する傾向があり、特に1歳魚については、魚群の分布位置や水深帯のみから、その魚群における年齢組成を判断することは困難であった。そのため、特に若齢魚を対象とした調査においては、できる限り多くの魚群反応に対して魚種確認を行い、個々の魚群反応ごとに年齢組成を確認した上で、その結果にしたがって魚群反応量の年齢分解作業を行うのが望ましい。しかし、海域や調査時期によっては、敷設漁具などの関係でトロール曳網による魚種確認が十分に行えない場合もみられた。特に冬季の日高湾沿岸のように、調査海域がスケトウダラ底刺し網の漁場と完全に重複する場合などは、海域全体にわたって魚種確認が全く行えない場合もあった。今後、魚種確認が困難な魚群あるいは海域を減らすためには、トロール操業に代わる魚種、サイズ確認方法の開発も必要となるであろう。浮魚類の採集に効果的であった曳航式刺し網 (塩出ら, 1997) や、ROVを用いた光学的観察による魚種およびサイズの確認を試みたものの (大島ら, 未

発表), これまでのところあまり良い結果を得るには至っていない。今後, *in situ* TS分布によるサイズ判別の可能性等も含めて, トロール曳網に代わりうる魚種, サイズ判別法の研究を進める必要がある。

要 約

北海道太平洋海域に分布するスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) 太平洋系群は, 1970年代以降毎年15~30万トンの漁獲量水準を維持しており, 日本における主要な漁獲対象資源の一つである。近年のスケトウダラ太平洋系群の特徴として, 数年間隔での卓越年級群の発生が挙げられる。新規加入群が卓越年級群であるか否かは, その後数年間にわたる資源動向に大きく影響する。よって, 精度の高い資源評価および資源動向の予測を行うためには, 翌年以降に新たに加える若齢魚群の年級豊度を事前に把握し, 将来の資源動向予測に反映させることが求められている。現在, 水産研究所においてスケトウダラの資源解析に用いられている手法はVirtual Population Analysis (VPA) であるが, VPAでは最近年の若齢魚の年級豊度を正確に推定することは困難である。そこで, 本研究では計量魚群探知機を用いた現存量調査によって加入前のスケトウダラ幼魚・若齢魚の年級豊度を直接推定し, 翌年以降の資源評価に反映させることを目的とした。

本研究の結果, 以下の結論を得た。

1) 調査機器, 調査船の特性及び調査の実施に必要な条件の把握

本調査で使用した調査船第三開洋丸では, 風波を船首方向から受ける航走時に, 船速7.8~8.8ノット付近で周波数38kHzのシステムに最大1.3dB程度の航走減衰が発生した。風波を船尾方向から受ける航走では, 航走減衰は発生せず, 音響資源調査の際には, 風波を船尾方向から受けるように航走方向を設定することが有効であることが示された。また, 北海道太平洋岸における平均風速の月別変化, 調査海域で実施される各種漁業活動, さらに資源評価のスケジュール等を考慮すると, 北海道太平洋海域における音響資源調査に適した時期は6~7月と考えられた。

2) 北海道太平洋側海域におけるスケトウダラ若齢魚の分布生態の把握および年級別現存量の推定

スケトウダラ若齢魚は初夏および冬季のいずれにおいても襟裳岬周辺から釧路沖にかけての陸棚域を中心に分布したが, 調査年によっては日高湾沿岸域においても道東海域に匹敵する規模の若齢魚の分布が確認さ

れた。また, 6月の調査では0歳魚は日高湾から道東海域への移入過程にあり, 道東海域における現存量評価の対象としては不適当と考えられた。

いずれの年齢群および季節においても, 魚群の日周鉛直移動が観察されたが, その範囲および程度が季節や年齢によって変化し, 昼夜および季節による年齢別現存量推定値の違いとして現れた。昼夜による若齢魚の年齢別現存量推定値は, 初夏の調査では昼間のデータに基づく値が, また盛夏および冬季の調査では夜間のデータに基づく値がより高い値を示す傾向が見られた。特に2000年級の評価においては昼夜の差が顕著で, 昼間の調査結果では年級豊度の高さを評価できない危険性が示された。調査時期の違いによる現存量推定結果の変動は昼夜による変動よりも大きく, 同じ年級群の現存量が毎冬の調査で減少し, 毎初夏の調査で再び増加する傾向が示された。冬季調査時に現存量推定値が大きく減少する原因としては, 魚群の調査海域外への逸散, 日周鉛直移動の変化に起因する海底デッドゾンの影響の増大, 航走減衰の増加による過小推定などが考えられたが, その原因と影響の程度を特定するには至らなかった。

3) スケトウダラ魚群の年齢組成および年齢別尾叉長組成を魚群分布位置から推定することによる, 新たな魚群反応の年齢分解法の検討

スケトウダラ魚群の分布環境から, その魚群における年齢組成および年齢別尾叉長組成を推定することにより, 個々の魚群反応に対する漁獲試験の実施回数を減らし, 漁獲試験にかかる調査努力量の削減を試みた。

魚群の分布海域および水深情報を用いて, 当該魚群における年齢別の平均尾叉長や平均TSを再現することができた。しかし, 年齢組成比については, 年齢により再現結果に違いが現れた。特に資源評価上最も重要な1歳魚については, パッチ的に分布する傾向が強く, 魚群の分布位置情報から1歳魚の分布割合を再現することは困難であった。

4) 空間統計学の適用による現存量推定値の精度評価および調査設計における適切な調査定線間隔の設定

年齢別現存量の推定に空間統計学を適用することにより, 得られた現存量の標準誤差 (SEM) は従来の統計手法によって得られるSEMの1/2~1/15程度まで大幅に縮小し, 空間統計学の適用の有効性が示された。

また, 定線間隔を変化させて現存量およびそのSEMを試算した結果, 現行の定線間隔である8マイルよりもさらに定線の間隔を狭めることにより, スケトウダラ若齢魚の分布をより細かく捉え, 現存量推定の精度

の向上が見込まれることが示された。ただし、定線の間隔を細かくすると、調査に要する期間が長くなるため、調査密度・精度と調査時間のトレードオフを考えつつ、調査定線を配置し、運用することが必要である。

5) スケトウダラ若齢魚群の年齢別現存量推定値の妥当性

初夏の道東海域に分布するスケトウダラ若齢魚の現存量推定値とVPAによるスケトウダラ太平洋系群の年齢別資源尾数との間に有意な正の回帰直線式が得られた。この結果から、音響資源調査によって得られる道東海域における若齢魚の現存量推定値が、スケトウダラ太平洋系群において翌年漁獲対象資源に加入する年級の規模を反映しており、加入前の年級豊度の推定における有効性が示された。ただし、回帰式が有意となった背景には、1995年級の豊度が音響資源調査、VPAいずれの方法においても非常に高く評価され、その他の年級と大きく離れた位置にプロットされたことの影響が大きい。今後も調査が継続されることによってデータ数が増え、かつプロット範囲が広がることにより、より信頼性の高い回帰直線式が得られることが期待される。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学水産科学研究科の飯田浩二教授、三浦汀介教授、齊藤誠一教授、向井 徹助教授ならびに桜井泰憲助教授には、主査・副査として研究の御指導、ならびに論文の御校閲を頂いた。深く御礼申し上げる。また、北海道区水産研究所八吹圭三氏、山村織生博士、小岡孝治博士、北海道水産試験場志田 修氏、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター宮下和士助教授ならびに日本海洋(株)鈴木千洋氏には、研究の遂行にあたり多くの貴重な御意見や御指摘、激励を頂いた。心より感謝申し上げます。調査の実施にあたり、水研センター所属調査船若鷹丸、陽光丸ならびに日本海洋株式会社所属調査船第三開洋丸の船長、乗組員、船上・陸上の支援スタッフの皆様には多大なる御協力を頂いた。また、水産庁資源課、水研センター本部ならびに海洋水産資源開発センター(JAMARC 現: 水研センター開発調査部)の皆様方には、長年にわたる音響資源調査の継続に際し様々なお力添えを頂いた。特にJAMARCの高橋正憲博士ならびに大島達樹氏には、現地各機関との調整、船上での調査指揮など調査のあらゆる場面で大変お世話になった。心より御礼申し上げますとともに、今後とも同調査の継続にお力添え下さるようお願い申し上げます。北大

大学院社会人博士課程入学にあたり、北水研の皆様には大変な御支援を頂いた。この成果を水研における業務に反映させることで、これまで頂いた御支援に報いる所存である。

なお、本研究には「我が国周辺海域資源調査等対策推進事業費」によって得られたデータを使用した。

文 献

- 安部幸樹, 飯田浩二, 向井徹, 1999: スケトウダラの音響資源調査における面積後方散乱係数の昼夜変動. 日水誌, **65**, 252-259.
- Aglen A., 1994: Sources of error in acoustic estimation of fish abundance, in "Marine Fish Behaviour in Capture and Abundance Estimation" (ed. by Fernö A. and Olsen S.), Fishing News Books, Oxford, pp. 107-133.
- 青山千春, 濱田悦之, 古澤昌彦, 1999: 海底反射を利用した計量魚群探知機の総合的検証. 日水誌, **65**, 78-85.
- バーロー P. A., 1986: 地理情報システムの原理—土地資源評価への応用— (安仁屋政武, 佐藤亮 訳). 古今書院, 東京, 233pp.
- Dalen J. and Løvic A., 1981: The influence of wind-induced bubbles on echo integration surveys. *J. Acoust. Soc. Am.*, **69**, 1653-1659.
- Foote K. G., 1980: Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strength. *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**, 2084-2089.
- 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.
- Francois R. E. and Garrison G. R., 1982: Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**, 1879-1890.
- 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 1983: 計量用魚群探知機の船間校正及び走航減衰調査. 水工研技報 (漁船工学), **4**, 61-71.
- 古澤昌彦, 1990: 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水工研報告, **11**, 173-249.
- 古澤昌彦, 1994: 水中音響利用の新技术—プランクトン計測を中心として—. 月刊海洋, **26**, 39-49.

- 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 澤田浩一, 高尾芳三, 1995: 計量魚群探知機の較正方法. 水工研技報 (漁船工学), **15**, 9-37.
- 濱野 明, 実藤 了, 水谷壮太郎, 隅川芳雄, 内田和良, 1988: 後方体積散乱強度に及ぼす船体動揺と調査条件の影響. 日水誌, **54**, 1533-1543.
- 濱津友紀, 八吹圭三, 1995: 北海道東部太平洋沿岸に分布するスケトウダラ *Theragra chalcogramma* の産卵回遊と産卵場. 北水研報告, **59**, 31-41.
- 濱津友紀, 柳本卓, 西村明, 三宅裕志, 2001: 潜水艇を用いたスケトウダラ魚群の観察. 漁業資源研究会議 底魚部会報, **5**, 39-41.
- Hasselblad V., 1966: Estimation of parameters for a mixture of normal distributions. *Technometrics*, **8**, 431-444.
- 服部 努, 北川大二, 成松庸二, 2001: 1997~2000年5月の東北海域におけるスケトウダラ0歳魚の分布の経年変化. 漁業資源研究会議底魚部会報, **5**, 19-25.
- 黄 斗濤, 飯田浩二, 向井 徹, 1997: 音響による底魚資源調査における海底識別処理の改善. 海洋音響学会誌, **24**, 165-175.
- 本田 聡, 2002: 漁業者アンケートに基づく北海道太平洋沿岸におけるスケトウダラ0歳魚の分布および移動. 水研センター研報, **2**, 1-14.
- 海上保安庁, 1974: 海底地形図 第6376号 釧路沖. 海上保安庁水路部, 東京.
- 小林時正, 1985: スケトウダラ漁業とその資源の利用. 漁業資源研究会議報, **24**, 47-62.
- MacLennan D. N. and Simmonds E. J., 1992: Fisheries Acoustics. Chapman and Hall, London, 325pp.
- MacLennan D. N., Fernandes P. G., and Dalen J., 2002: A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES J. Mar. Sci.*, **59**, 365-369.
- Macpherson E. and Duarte C. M., 1991: Bathymetric trends in demersal fish size: is there a general relationship? *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **71**, 103-112.
- Mitson R. B., 1995: Underwater noise of research vessels, review and recommendations. *ICES Coop. Res. Rep.* No. 209, Copenhagen, 61pp.
- Miyake H., Yoshida H., and Ueda Y., 1996: Distribution and abundance of age-0 juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, along the Pacific coast of southeastern Hokkaido, Japan. *NOAA Tech. Rep. NMFS*, **126**, 3-10.
- Nishimura A., Hamatsu T., Yabuki K., and Shida O., 2002: Recruitment fluctuations and biological responses of walleye pollock in the Pacific coast of Hokkaido. *Fish. Sci.*, **68**(Suppl. I), 206-209.
- Petitgas P., 1993: Geostatistics for fish stock assessments: a review and an acoustic application. *ICES J. Mar. Sci.*, **50**, 285-298.
- Petitgas P. and Prampart A., 1993: EVA (Estimation VAriance), a geostatistical software on IBM-PC for structure characterization and variance computation. ORSTOM, Paris, 55pp.
- Petitgas P., 1996: Geostatistics and their applications to fisheries survey data. In "Computers in fisheries research" (ed. by Megrey B. A. and Moksness E.), Chapman and Hall, London, pp. 113-142.
- Petitgas P. and Lafont T., 1997: EVA2 : estimation variance version 2. A geostatistical software on Windows 95 for the precision of fish stock assessment surveys. *ICES CM*, **Y22**.
- 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.
- Rivoirard J., Simmonds J., Foote K. G., Fernandes P., and Bez N., 2000: Geostatistics for Estimating Fish Abundance. Blackwell Science Ltd., Oxford, 206pp.
- 佐々木正義, 長澤和也, 1993: 北海道えりも岬以西太平洋海域のスケトウダラ若年魚の分布. 北水試研報, **42**, 157-164.
- 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.
- 柴田恵司, 西ノ首英之, 天下井清, 1970: 船体動揺とecho音圧の変動-I. 日本航海学会誌, **44**, 23-28.
- 志田 修, 山村織生, 三宅博哉, 1999: 道東太平洋沿岸におけるスケトウダラ0歳魚の分布と成長に伴う移動について. 北水試研報, **54**, 1-7.
- Shida O., 2001: Seasonal differences in the diel vertical migration patterns of young walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, and their impact on acoustic biomass estimation. *Proceedings of the International Symposium on*

- Advanced Techniques of Sampling Gear and Acoustical Surveys for Estimation of Fish Abundance and Behavior (ACOUSTGEAR2000)*. Hakodate, Hokkaido, 172-179.
- 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.
- 志田 修, 西村 明, 2002: 秋期の道東太平洋海域に分布するスケトウダラ0歳魚の孵化日組成と産卵群の関連. 水産海洋研究, **66**, 232-238.
- Simrad Subsea A/S, 1993: Simrad EK500 Scientific Echo Sounder Operator Manual P2170E Software Version 4.01, Horten, 202pp.
- 塩出大輔, 藤森康澄, 清水 晋, 今井信幸, 三浦汀介, 1997: サンプルング用曳航型中層刺網の水深調節. 日水誌, **63**, 920-927.
- Sokal R. R. and Rohlf F. J., 1995: Biometry-The Principles and Practice of Statistics in Biological Research, 3rd ed., W. H. Freeman and Company, New York, 887pp.
- Stanton T. K., 1982: Effects of transducer motion on echo-integration techniques. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**, 947-949.
- 水産庁, 2001: ABC算定のための資源管理基準と漁獲制御ルール (平成13年度). 我が国周辺海域の漁業資源評価 (魚種別系群別資源評価), 水産庁増殖推進部ほか, 3-10.
- Swain D. P., 1993: Age- and density-dependent bathymetric pattern of Atlantic cod (*Gadus morhua*) in the southern Gulf of St. Lawrence. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**, 1255-1264.
- Takao Y. and Furusawa M., 1995: Noise measurement by echo integrator. *Fish. Sci.*, **61**, 637-640.
- 田中昌一, 1956: Polymodalな度数分布の一つの取扱方及びそのキダイ体長組成解析への応用. 東海水研研報, **14**, 1-13.
- 田中昌一, 1985: 水産資源学総論. 恒星社厚生閣, 東京, 381pp.
- 辻 敏, 1979: 北海道周辺の系統群. ベーリング海及びカムチャッカ半島周辺海域のスケトウダラ資源の系統群の解明に関する研究 成果報告書, 農林水産技術会議事務局, 139-150.
- Urlick R. J., 1954: The backscattering of sound from a harbor bottom. *J. Acoust. Soc. Am.*, **26**, 231-235.
- Urlick R. J., 1956: The processes of sound scattering at the ocean surface and bottom. *J. Mar. Res.*, **15**, 134-148.
- ユーリック R. J., 1985: 水中音響の原理 (土屋明訳), 共立出版, 東京, 415pp.
- 渡辺一俊, 八吹圭三, 濱津友紀, 山村織生, 1993: 初夏の道東太平洋沿岸におけるスケトウダラ *Theragra chalcogramma* の分布. 北水研報告, **57**, 53-61.
- Williamson N. J. and Traynor J. J., 1996: Application of a one-dimensional geostatistical procedure to fisheries acoustic surveys of Alaskan pollock. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 423-428.
- 八吹圭三, 1994: ホッケの耳石染色法による年齢査定と根室海峡における成長. 漁業資源研究会議 北日本底魚部会報, **27**, 39-48.
- 八吹圭三, 2000: スケトウダラ太平洋系群の資源状態について. 東北底魚研究, **20**, 41-44.
- 八吹圭三, 2001a: 平成13年スケトウダラ北部日本海系群の資源評価. 我が国周辺海域の漁業資源評価 (魚種別系群別資源評価), 水産庁増殖推進部ほか, 100-114.
- 八吹圭三, 2001b: 平成13年スケトウダラ根室海峡系群の資源評価. 我が国周辺海域の漁業資源評価 (魚種別系群別資源評価), 水産庁増殖推進部ほか, 115-123.
- 八吹圭三, 2001c: 平成13年スケトウダラ北見沖合系群の資源評価. 我が国周辺海域の漁業資源評価 (魚種別系群別資源評価), 水産庁増殖推進部ほか, 124-131.
- 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. 我が国周辺海域の漁業資源評価 (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. 我が国周辺海域の漁業資源評価 (魚種別系群別資源評価), 水産庁増殖推進部ほか, 136-153.
- 吉田久春, 1979: 標識放流. ベーリング海及びカムチャッカ半島周辺海域のスケトウダラ資源の系統群の解明に関する研究成果報告書, 農林水産技術会議事務局, 89-119.
- 吉田久春, 1987: 北海道周辺海域におけるスケトウダラ標識放流再捕について. 漁業資源研究会議 北日本底魚部会報, **20**, 83-92.

調査船による音響資源調査の結果、スケトウダラ若齢魚は初夏および冬季のいずれにおいても襟裳岬周辺から釧路沖にかけての北海道東部太平洋海域（道東海域）の陸棚域を中心に分布した。調査時期の違いによる現存量推定値の変動は、昼夜による変動よりも大きく、同じ年級群の現存量が毎冬の調査で減少し、翌年初夏の調査で再び増加する傾向が示された。この原因として、魚群の日周鉛直移動の影響や魚群の逸散などの可能性が示唆されたが、各要因の影響の有無あるいは程度を特定するには至らなかった。

音響資源調査で推定した、年別、季節別、年齢別現存量のうち、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と、その翌年度以降にVPAによって過去に遡って推定されるスケトウダラ太平洋系群全体での若齢魚の年級豊度との間に、有意な正の直線回帰関係が得られた。これは、音響資源調査によって得られた加入前のスケトウダラ1歳魚の現存量推定値が、その翌年度以降に徐々に判明する新規加入群量と比例関係にあることを意味する。音響資源調査の実施年数が少ないため、現状ではVPAの結果と比較できるデータが限られているものの、新規加入群が卓越年級群かあるいは低い年級豊度であるかの判断には十分に有効であることが示された。今後調査が継続する中で、データ数が増えることにより、回帰関係の信頼性が向上し、より高い精度での年級豊度の予測が可能となると期待される。

No. 12, 25-126 (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

本田 聡 (北海道区水産研究所)

近年、北海道太平洋海域に分布するスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) 太平洋系群では、数年間隔で卓越年級群の発生が観察されている。卓越年級群の発生は、その後数年にわたって資源状態に多大な影響を与えることから、新規加入群の豊度を出来る限り早く把握することは、短期的な資源動向予測を行う上で非常に有効である。一方、水産研究所ではスケトウダラの資源解析に Virtual Population Analysis (VPA) を用いているが、その手法の特性上、漁獲開始から数年を経過した年級群については過去に遡って精度良く評価できるのに対して、漁獲情報の蓄積が乏しい最近年の若齢魚の年級豊度を正確に推定することは困難である。本研究では、このVPAの弱点である最近年の若齢魚の量的評価を補完する試みとして、音響資源調査によるスケトウダラ幼魚・若齢魚の年級豊度の直接推定を実施し、その有効性について検討した。