

音響資源調査における航走減衰の発生と船速 および気象・海象条件との関係

本田 聡,^{1*} 鈴木千洋,^{2a} 向井 徹,² 飯田浩二²

(2002年5月31日受付, 2003年1月22日受理)

¹水産総合研究センター北海道区水産研究所, ²北海道大学大学院水産科学研究科

Occurrence of acoustic attenuation by sailing corresponding
with ship speed and sea condition in hydroacoustic surveys

SATOSHI HONDA,^{1*} CHIHIRO SUZUKI,^{2a} TOHRU MUKAI² AND KOHJI IIDA²

¹Hokkaido National Fisheries Research Institute, Kushiro, Hokkaido 085-0802, ²Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

The attenuation of acoustic energy due to the effects of sailing were measured on the RV Kaiyo-maru No. 3 by integrating the area backscattering strength (S_a) of the sea bottom. The attenuation of the bottom S_a appeared with the increase of the ship speed. In particular, the attenuation was apparent under the head sea condition of sailing; maximum attenuation of 1.3 dB was attained at 38 kHz, and 0.7 dB at 120 kHz. On the other hand, no clear attenuation occurred under the conditions of a following sea. Under the head sea condition of sailing, the attenuation by sailing occurred at a slower sailing speed than the appearance of a missing echo or apparent attenuation shown on the echogram. That is, the attenuation by sailing exerted an influence upon the acoustic data without the operator being aware of it. When planning an acoustic survey by the RV Kaiyo-maru No. 3, or even in a survey field, setting the sailing direction in a following sea will prevent underestimation of the acoustic biomass index caused by the acoustic attenuation due to the effects of sailing.

キーワード：音響資源調査, 航走減衰, 計量魚探機, 船速, 風波

近年, 計量魚群探知機(以下, 計量魚探機)を用いて, 重要水産資源に対する現存量の推定が数多く実施されている。計量魚探機は, 水中に発した超音波が魚群などの標的によって散乱し, 送受波器に戻る際の音圧を測定することにより, 魚群分布密度を推定する。この送受波器を船底に装備し, あるいは曳航索で水中を曳航しながら連続的に送受波を繰り返すことによって, 航跡下の魚群その他の標的を探索し, かつその分布密度の指標となる体積後方散乱強度 (Volume Backscattering Strength, 以後 S_V) あるいは一単位あたりの散乱強度にあたるターゲットストレングス (Target Strength, 以後 TS) を連続的に計測することができる。¹⁾

音響資源調査では, 計量魚探機の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。よって, 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, 最適な条件の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校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), 雑音の少ないエンジン回転数や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。²⁾ さらにもう一つ, 調査の実施に当たって事前に明らかにしておくべき特性として, 航走減衰が挙げられる。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。^{3,4)} 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

* Tel : 81-154-92-1714. Fax : 81-154-92-1714. Email : HONDA.Satoshi@fra.affrc.go.jp

^a 現所属：日本海洋株式会社 (Nippon Kaiyo Co., Ltd., Kita, Tokyo 114-0005, Japan)

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。

日本海洋株式会社所属の第三開洋丸は、計量魚探機を装備したトロール型漁業/海洋調査船で、各研究機関による備船調査、特に音響資源調査において頻繁に用いられる調査船の一つである。本研究では、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

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38 kHzと120 kHz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60 cm突出する形で取り付けられている（Fig. 1）。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⁵⁾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、古澤ら³⁾、濱野ら⁶⁾の方法に準じた。周波数 38 kHz および 120 kHz でとら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、実際に本船を用いて実施されている音響資源調査と同じ 0.1 海里（以下、nmi と表記）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 nmi 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、古澤ら³⁾および濱野ら⁶⁾が「海底面を中心とした上下計 10 m」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 5 m～海底下 10 m」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

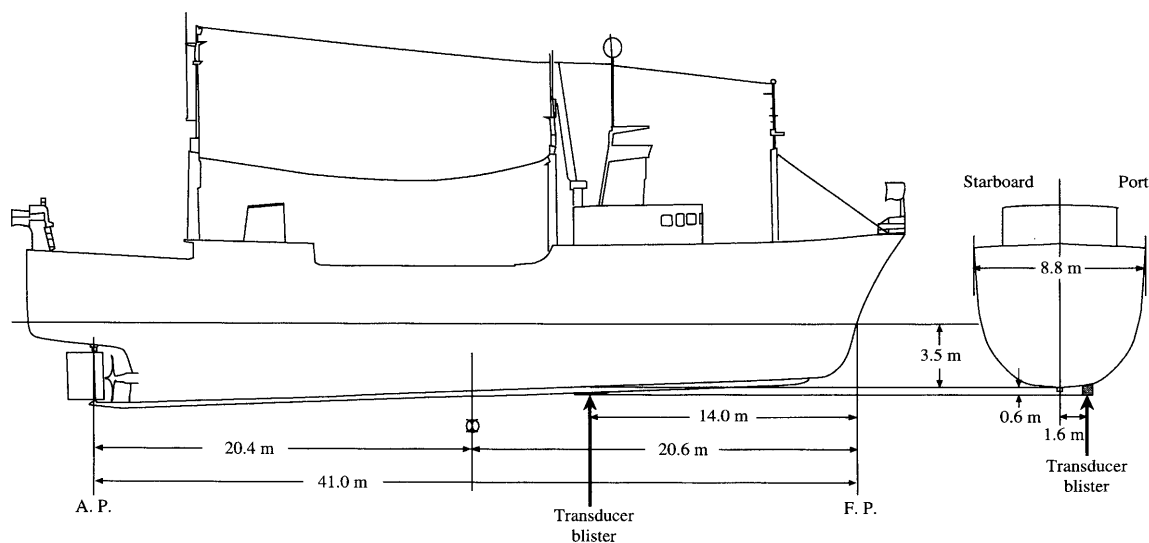


Fig. 1. Schematic side and section views of RV Kaiyo-maru No. 3.

度全体をとらえられるよう, 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 日に北海道東部太平洋岸の厚内沖約 8 nmi, 海深 77~79 m 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 nmi 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, 海底の起伏がなく, 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⁷⁾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 1)。

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 1)。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 nmi のばらつきが生じた。

なお, 過去に実施された航走減衰試験では, 海底の強い反射によるアンプの飽和を防ぐために, 事前に出力の低減を施しているが,^{3,6)} 本試験で使用した計量魚探機 EK-500 はダイナミックレンジが 160 dB と広く,⁸⁾ 海底からの強いエコーレベルを受信してもアンプが飽和することはないと予想されたことから, 出力の低減などの措置は行わなかった。

また S_V , S_a 等の記号の表記法については, MacLennan ら⁹⁾に従った。

Table 1. Conditions of the experimental runs and the sea states

Leg	Direction against swell	Speed (kn)	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.

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, 風浪 3 で、後に風速約 2 m, うねり 3, 風浪 2 と若干静穏になった (Table 1)。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 1 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、実際には風の方角とうねりの方角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与えているか否か、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 nmi 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. 2 に [船速 7 ノット、復路] における 38 kHz, 120 kHz 両周波数で収録された海底面上 5 m～海底下 10 m 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. 2 の例では、データによって海底深度が 77 m あるいは 78 m のどちらかの値をとるため、海底面上 5 m～海底下 10 m の範囲についても、72～87 m と 73～88 m の 2 種類がグラフ上に混在している。Fig. 2 をみると、周波数によって、海底

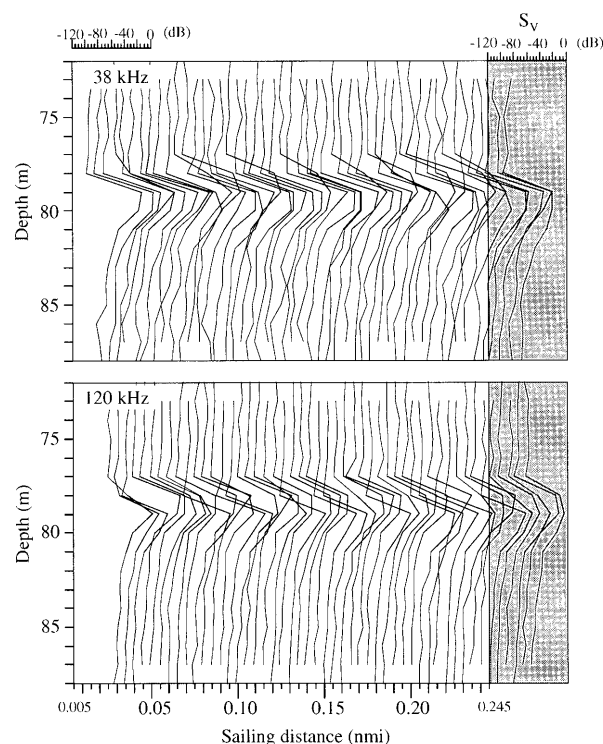


Fig. 2. Distribution pattern of mean S_V in the proximity of the sea bottom at each 1 m vertical unit (Upper: 38 kHz, Lower: 120 kHz). Thick lines indicate the layer 3 m beneath the bottom.

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 5 m～海底下 10 m の範囲で鉛直方向に合算して求めた海底 S_a は、周波数 38 kHz の方が周波数 120 kHz の場合よりも 4 dB 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 3 m 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 3 m までの層における S_V によって決定され、水中および [見掛け上] 海底下 3 m 以深から得られる S_V は、海底 S_a の大きさに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 5 m～海底下 10 m] 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 nmi に設定し、1.3～1.4 nmi 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. 3)。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

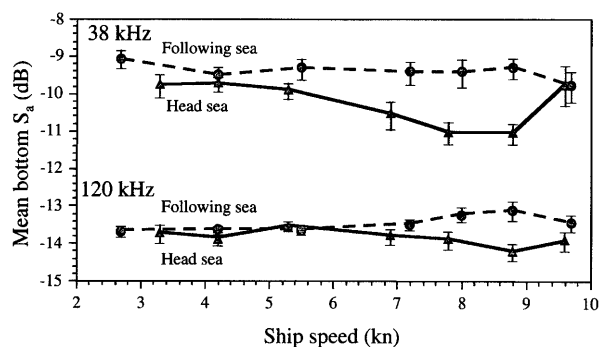


Fig. 3. Variation of the mean bottom S_a and its standard error with increasing ship speed under the combinations of the three factors: frequency, speed and direction.

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 38 kHz で 1.30 dB, 120 kHz で 0.67 dB であり, 38 kHz のほうがより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 38 kHz のデータにおいて平均海底 S_a が 0.7 dB ほど低下した。また, 120 kHz 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 0.5 dB) 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¹⁰⁾を行い, 各データセット間で分散に有意な差がないことを確認の上, 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 2)。Fig. 3 から明らかなように, 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ものと考えられる。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 120 kHz よりも 38 kHz 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, 38 kHz 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

Table 2. ANOVA table for analyzing the effects of the three different factors: frequency, direction and speed against the attenuation by sailing

Source of variation	df	Sum-of-squares	Mean square	F	p
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 ($p=0.05$)

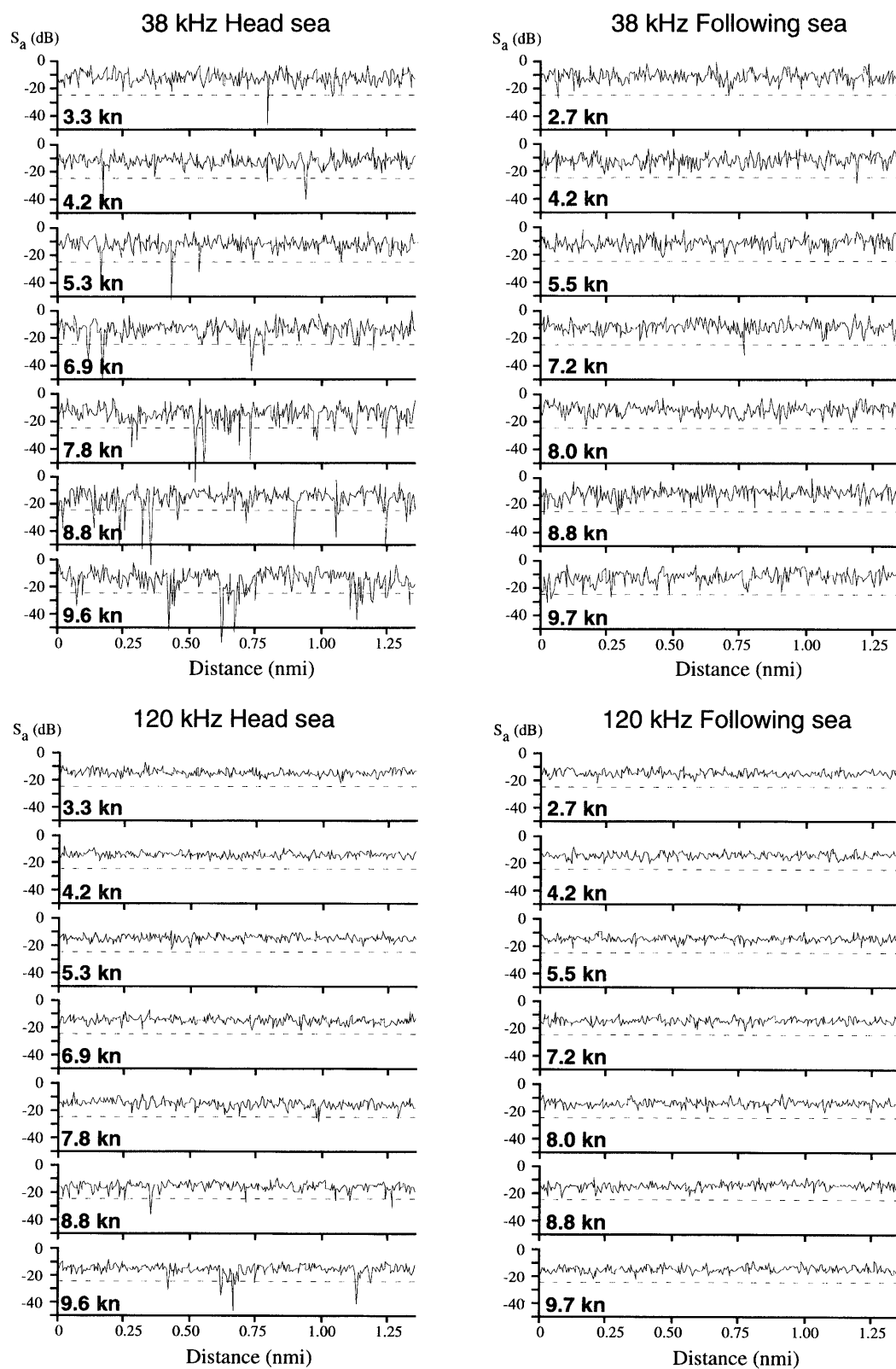


Fig. 4. Variability of the mean bottom S_a taken for every 0.005 nmi run for each combination of ship speed and direction. Broken lines indicate the -25 dB level.

S_a に有意差が認められた。一方, 120 kHz 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 nmi 毎に抽出した海底 S_a の挙動について検討した。積分層の設定は, 先の解析と同様に, 海底上 5 m ~ 海底下 10 m の 15 m 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. 4)。一方, 風波を船首側から受ける航走において, 38 kHz, 120 kHz とともに, 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。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減が記録されていた。そこで, この海底 S_a の急激な低下が, ESDU を 0.1 nmi とし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 -25 dB 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 nmi に設定して平均海底 S_a を計算した (Fig. 5)。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, -25 dB 以下の値を除くことにより, 38 kHz で最大 0.4 dB, 120 kHz では最大 0.2 dB 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。

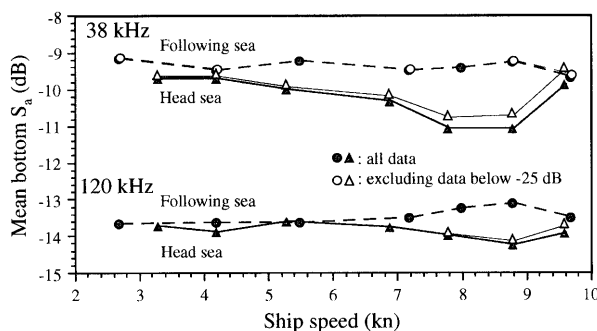


Fig. 5. Average of the bottom S_a taken for every 0.005 nmi run including or excluding “slumped” data which were below -25 dB.

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とら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。¹¹⁾ 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う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 78 m 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 1500 m/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 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」として受波器でとらえられ, 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。¹²⁾ 黄ら¹³⁾はランベルトの法則を用いて、周波数 25 kHz 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^{14,15)}は、本研究で使用した周波数に比較的近い周波数帯 (55 kHz, 60 kHz) 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 10 dB 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の関係性を推察し、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 1, Fig. 6)、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 nmi 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

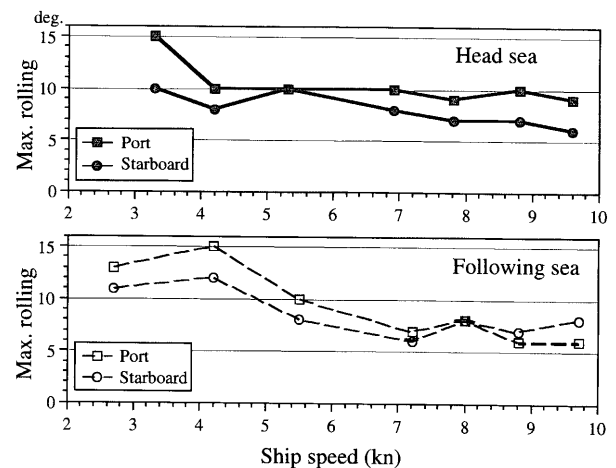


Fig. 6. Maximum rolling angles with the combination of two factors: direction and ship speed. Upper: head sea, Lower: following sea condition.

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¹⁶⁾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⁶⁾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に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だろう。

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 38 kHz では 1.30 dB, 120 kHz では 0.67 dB 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. 3)。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³⁾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³⁾の研究では船によって最大 1 dB から 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 1.3 dB (38 kHz) 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、38 kHz, 120 kHz 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⁶⁾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、88 kHz において高速航走時に減衰が観察されたが、200 kHz 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、88 kHz では減衰が観測されなかったのに対して、200 kHz では減衰が観察された。この理由として、88 kHz では航走時のピッチングによって生じた気泡が、また 200 kHz 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、船速の上昇にともな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、120 kHz における航走減衰の影響は、38 kHz におけるそれよりも小さく、この点についても、濱野⁶⁾の報告と一致した。しかし、古澤³⁾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 Løvic¹⁷⁾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を意味する。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。

なお、同時期に実施したノイズ測定の結果によると、¹⁸⁾ 38 kHz では対水 8~9 ノット付近で最も航走ノイズが低く、それ以上およびそれ以下の船速の双方においてノイズが増加する傾向が見られた。また 120 kHz では、船速に関わらず、ノイズレベルは殆ど変化が見られなかった。このノイズ測定結果と、本研究で得られた航走減衰特性を考え合わせると、第三開洋丸で音響資源調査を行う場合は、風波を船尾側から受ける航走が可能な場合には 8~9 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、海況に応じて船速を大きく変更し、ノイズと航走減衰の両影響が共に小さい状態で調査を実施するのが望ましい。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、航走減衰の影響を極力除いた状態での音響資源調査を行うことが可能となるであろう。

謝 辞

本研究の実施にあたり、第三開洋丸の小島洋船長ならびに乗組員の方々、また第三開洋丸を所有する日本海洋株式会社の皆様より多大なるご協力を頂いた。麗水大学の黄 斗濤助教授には、データ解析のためのプログラ

ム作成およびその修正作業を通じて大変お世話になった。北海道区水産研究所の箱山洋博士ならびに北海道大学水産科学研究科の森田健太郎博士には、データの統計処理にあたりご議論、ご助言を頂いた。さらに 2 名の匿名の査読者の方々より、本稿に対し有益なご助言とご指摘を頂いた。ここに記して皆さまに心より御礼申し上げる。

なお、本研究は水産庁〔我が国周辺水域資源調査等推進対策委託事業費〕によって行われた。

文 献

- 1) MacLennan DN, Simmonds EJ. *Fisheries Acoustics*. Chapman & Hall, London. 1992; 1-325.
- 2) Mitson RB. Underwater noise of research vessels, review and recommendations. *ICES Coop. Res. Rep.* No. 209, Copenhagen. 1995; 1-61.
- 3) 古澤昌彦, 宮野鼻洋一. 計量用魚群探知機の船間校正および走航減衰調査. 水工研技報 (漁船工学) 1983; 4: 61-71.
- 4) 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 澤田浩一, 高尾芳三. 計量魚群探知機の較正方法. 水工研技報 (漁船工学) 1995; 15: 9-37.
- 5) 青山千春, 濱田悦之, 古澤昌彦. 海底反射を利用した計量魚群探知機の総合的検証. 日本誌 1999; 65: 78-85.
- 6) 濱野 明, 実藤 了, 水谷壮太郎, 隅川芳雄, 内田和良. 後方体積散乱強度に及ぼす船体動揺と調査条件の影響. 日本誌 1988; 54: 1533-1543.
- 7) 海上保安庁. 海底地形図 第 6376 号 釧路沖. 海上保安庁水路部, 東京. 1974.
- 8) Simrad Subsea A/S. Simrad EK500 Scientific Echo Sounder Operator Manual P2170E Software Version 4.01, Horten. 1993; 1-202.
- 9) MacLennan DN, Fernandes PG, Dalen J. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES J. Mar. Sci.* 2002; 59: 365-369.
- 10) Sokal RR, Rohlf FJ. *Biometry - The principles and practice of statistics in biological research, Third Ed.* W. H. Freeman and company, New York. 1995; 1-887.
- 11) Stanton TK. Effects of transducer motion on echo-integration techniques. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982; 72: 947-949.
- 12) ユーリック RJ. 「水中音響の原理 (土屋明訳)」共立出版, 東京. 1978; 1-415.
- 13) 黄 斗濤, 飯田浩二, 向井 徹. 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 1997; 24: 165-175.
- 14) Urick RJ. The backscattering of sound from a harbor bottom. *J. Acoust. Soc. Am.* 1954; 26: 231-235.
- 15) Urick RJ. The processes of sound scattering at the ocean surface and bottom. *J. Mar. Res.* 1956; 15: 134-148.
- 16) 柴田恵司, 西ノ首英之, 天下井清. 船体動揺と海底 echo 音圧の変動-I. 日本航海学会誌 1970; 44: 23-28.
- 17) Dalen J, Løvic A. The influence of wind-induced bubbles on echo integration surveys. *J. Acoust. Soc. Am.* 1981; 69: 1653-1659.
- 18) 日本海洋株式会社. SimradEK500 システムキャリブレーション結果報告, 日本海洋株式会社, 東京. 1999; 1-16.