

漁業練習船南星丸が放射する水中音

松野保久^{1*}, 日高正康¹, 東 政能², 幅野明正², 中武利郎²

The Underwater Sound Emitted by Fishing Training Ship Nansei-Maru

Yasuhisa Matsuno^{1*}, Masayasu Hidaka¹, Masataka Higashi²,
Akimasa Habano², and Toshiro Nakatake²

Key words : underwater sound, underwater sound level, underwater sound spectrum, fishing training ship

Abstract

The measurements were carried out for the purpose of grasping the actual condition of underwater sound emitted from the ship, in order to enable a precise evaluation of fish resources using an echo integrator. The results obtained in this study are as follows :

- 1 . When the Nansei-Maru was drifting, the mean value of sound pressure level was 143 dB at a vertical distance of just 10 m from the ship's bottom. The numerical values with main engine rotation and with the presence or absence of the generator engine showed no significant differences.
- 2 . When the Nansei-Maru was cruising, values of 150 dB-153 dB were shown at a horizontal distance of 30 m from the ship. Fishes were startled by sound pressure levels of 130 dB-150 dB; the sound pressure level was calculated to be 130 dB at a distance of about 380 m from the ship and 140 dB at a distance of about 120 m. It must be borne in mind that escape behavior may be stimulated in schools of fish at these distances.
- 3 . While drifting, many line spectra with higher harmonics were distinguished from the basic frequency of the main engine and the generator engine rotation .
- 4 . While cruising ahead, at a frequency band of 200 Hz or less, the continuous spectrum from the propeller blade rotation and the line spectra which arise from the propeller shaft rotation were distinguished.

海洋中に存在する周囲雑音 (ambient noise) は大きく自然雑音, 生物雑音, 人工雑音等に分類され, 海域あるいは時系列の相違により異なった特徴がみられる。船舶から放射される水中音は人工雑音の主要な部分を占めている。その発生機構は, 船舶に装備される主機関やその他種々の機械類から発する振動・騒音と, プロペラの回転や乱流が複雑に合成されることによる。前者は機械類の回転, 上下動などが規則的であるため線スペクトルを示し, 後者は広帯域にわたる連続スペクトルを示す¹⁾。

これまで船舶が海洋中へ放射する水中音の研究は, 主に音響機器に影響する航走雑音の低減を目的に行われてきた²⁾。しかし, 海中生物やその棲息環境への影響に関する研究は, 船舶後進音を用いた集魚³⁾, 船舶海中放射雑音の魚への影響^{4,5)}, および沿岸漁場における船舶雑音の到来方向の探知⁶⁾などまだ数少ない。船舶の放射水中音は高出力, 広帯域であるため, 漁場における魚の逃避行動に関連するものと推定される⁷⁾。これは漁獲ならびに, 計量魚群探知機による魚類の資源量推定の精確さ

¹ 鹿児島大学水産学部環境情報科学講座 (Department of Environmental and Information Sciences, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 4-50-20 Shimoarata, Kagoshima 890-0056, Japan)

² 鹿児島大学水産学部練習船南星丸 (The Fishing Training Ship Nansei-Maru, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 4-50-20 Shimoarata, Kagoshima 890-0056, Japan)

* Corresponding author, Email:matsuno@fish.kagoshima-u.ac.jp

にも影響を与えるものである。

漁業練習船南星丸は調査船としての役割も持ち、計量魚群探知機を使用して、浮き魚類等の資源量推定を実施している。よって南星丸の海洋中へ放射する水中音の実態を明らかにし、魚類を始めとする海洋生物への影響の基礎資料を得るため、今回の測定を実施した。

方 法

供試船として使用した南星丸の主要目をTable 1に示した。南星丸が放射する水中音は、漂泊中と航走中の別に測定を実施した。測定場所は比較的船舶交通量の少ない鹿児島湾奥中央部海域で、当日の天候は晴れ、風速4 m/sであった。また両測定時とも南星丸装備のレーダ観測により1.5海里以内に他の船舶は認められなかった。

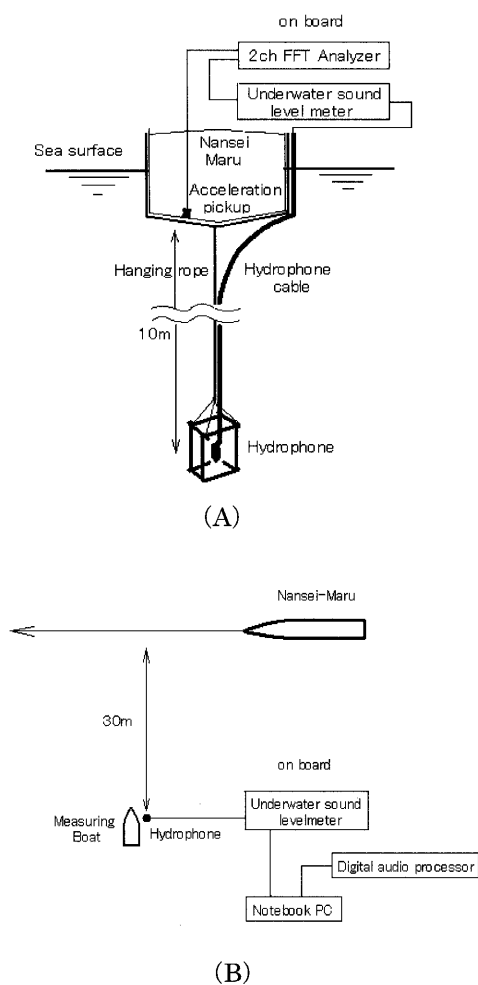


Fig. 1 Block diagram of equipment used to measure the underwater sound of Nansai-Marui.

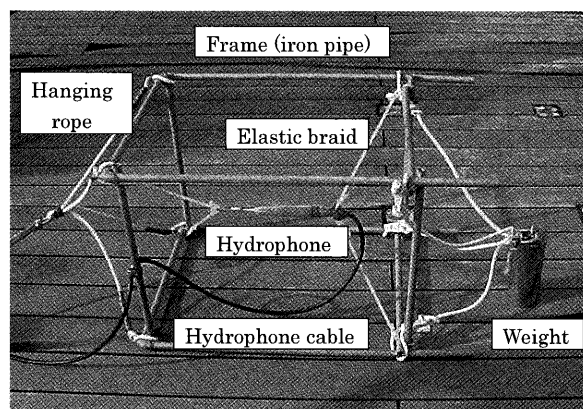
(A) : Set-up to measure the underwater sound when the ship is drifting.

(B) : Method of measuring the underwater sound when the ship is cruising.

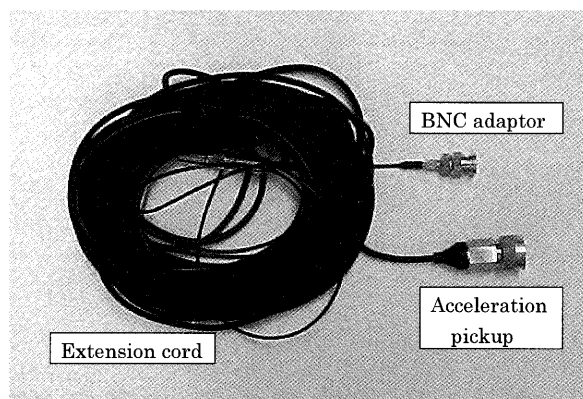
漂泊中における測定方法をFig.1 (A) に示した。放射された水中音を検知するハイドロフォンST-1020 (沖電気工業製) を南星丸船体中央付近、機関室船底直下、船底外板より距離10 mに懸垂設置した。この時、ハイドロフォンは懸垂用ロープ等の振動による低周波雑音混入を低減するため、四角柱型の鉄枠 (46×50×64 cm) 内

Table 1 Principal particulars of Nansai-Marui.

Hull	Steel
Gross tonnage	175 t
Length over all	41.96 m
Breadth (molded)	7.50 m
Depth (molded)	3.30 m
Designed full load draft (molded)	2.90 m
Main engine	1,323 kW (1,800 PS)
Generator engine	183 kW (250 PS)
Generator (Main engine driving)	160 kW (200 KVA)
Propeller	CPP 4blades
Bow thruster	15 kW



(A)



(B)

Fig. 2 Photographs of sensor to measure the underwater sound and vibration of the hull.

(A) : Hydrophone (B) : Acceleration pickup

にゴムコード（直径7 mm）でFig. 2 (A) に示したようにセットした。ハイドロフォンで受波した放射水中音は、プリアンプ・キャプタイヤケーブルを介して船上の水中音圧計SW-1020（沖電気工業製）に導いた。また機関室内に設けられたソナースペースの底部に、Fig. 2 (B) に示した船体振動を測定するための加速度ピックアップPV43（リオン製）を取り付けた。この振動加速度信号と水中音信号を同時に2チャンネルFFT分析器SA-78（リオン製）に記録した。このデータは後日研究室にて、CAT-78WR用オフライン分析処理システムを使用して周波数解析等を実施した。これら解析のためのデータ長は10秒、音圧レベルの基準値は1 μPa 、加速度レベルの基準値は10 $\mu\text{m/s}^2$ とした。

漂泊中における主機回転数は500 rpm, 650 rpm, 700 rpm, 750 rpmの4種類とし、発電機は主機駆動のみの場合と、発電機も合わせて作動させた場合の2種類とした。発電機回転数は1200 rpmであった。

航走中における測定方法をFig. 1 (B) に示した。測定船である小型ボートから、漂泊中の測定と同様にセットしたハイドロフォン（Fig. 2 (A)）を水深5 mに懸垂設置した。ハイドロフォンで受波した信号は前記水中音圧計を通して、パソコンに入力した。このとき音響解析ソフトSpectra Pro（SOUND TECHNOLOGY製）を使用したことにより、現場においてリアルタイムで、あるいは記録されたデータを後日、研究室において周波数解析が可能であった。又取り込み周波数領域を1.7 Hz~20 kHzまで平坦な特性をもたせるため、Digital audio processor SE-U55（オンキョウ製）を使用した。なお周波数解析時の周波数分解能は0.977 Hzであった。

供試船である南星丸の前進航走時、後進航走時およびバウスラスター使用時、それぞれの条件をTable 2に示したように設定し放射水中音を測定した。ここに示したように、Full aheadのみ主機回転数を700 rpm、これ以外は650 rpmとし、翼角を変えることにより速力を調

整した。バウスラスター使用時の主機回転数は650 rpmで、プロペラ軸とのクラッチは離脱状態とした。バウスラスターの回転数は500 rpm, 1000 rpm, 1500 rpmの3種類とした。発電機は漂泊中と同様の条件とした。各条件における南星丸の航走時は、測定船から最接近距離30 mで通過するよう操船した。又距離測定は南星丸装備のレーダを使用した。

結果および考察

放射水中音の音圧レベル

音圧レベル（オーバーオール値）の全測定結果をTable 3に示した。漂泊時、全ての測定において、音圧レベルは140 dBを超えた。主機回転数の違いならびに発電機駆動の有無による音圧レベルの有意な差はみられなかった。主機回転数500 rpmの時、主機・発電機（主機駆動）駆動時より主機・発電機（主機駆動）・発電機を合わせて駆動した状態の方が、3 dB小さい値を示したがこの起因は不明であった。音圧レベルを検討する時、ハイドロフォンにおける、放射水中音の直接波と海底反射波との干渉の影響を検討する必要がある。ハイドロフォンにおける両波干渉による音の強さP(dB)は次式によって表される⁸⁾。

$$P = 10 \text{Log} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\mu h^2}{(2d-h)^2} \right)^2 + \frac{\mu h^2}{(2d-h)^2} \times \cos \left(\frac{4\pi f(d-h)}{c} \right) \right] - 20 \text{Log} h$$

ここで μ : 海底面の振幅反射係数

h : 音源からハイドロフォンまでの距離

d : 音源から海底面までの距離

f : 音波の周波数 c : 音速

今回の測定において、 h は10 m、 d は140 m \pm 5 mの範囲にあり、底質は泥で振幅反射係数は0.2⁹⁾と推定された。そこで、周波数20 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 600 Hz, 1000 Hzを例にとり、 d が135 m~145 mまで1 m間隔で変化したときの、各周波数における振幅への干渉についてシミュレートした結果をFig. 3に示した。この結果、音圧レベルの変動幅は各周波数とも0.005 dB以内であった。よって今回の漂泊中の測定結果には、潮流など外力によって船が流され、水深が若干変化したとしても、干渉による音圧レベルの変動は無視できた。これは d の値が h の値に対し十分大きく、かつ μ の値が小さいため、海底からの反射波パワーが極めて小さくなったためと推定される。なお1000 Hz以上の周波数における変動幅は、全て、1000 Hzより小さな値を示した。

航走時の音圧レベル測定結果をTable 3に示した。ここでDead slow aheadの149 dBを除き、全て150 dB以上

Table 2 Measurement conditions of Nansei-Marui at the cruising.

Speed order	Main engine rotation (rpm)	Propeller pitch (degree)	Ship's speed (kt)
Full ahead	700	22	12.7
Half ahead	650	12	8
Slow ahead	650	7	5
Dead slow ahead	650	4	3
Full astern	650	-10	-6
Half astern	650	-7	-4.8
Slow astern	650	-4	-3

Table 3 Underwater sound pressure level emitted by Nansei-Maru.

Drifting			Ahead	
Main engine rotation (rpm)	Sound pressure (dB)		Speed order	Sound pressure (dB)
	ME* ¹ +G(MED)* ²	ME* ¹ +G(MED)* ² +GE* ³		ME* ¹ +G(MED)* ²
500	143	140	Full	152
650	142	142	Half	151
700	*	145	Slow	153
750	145	144	Dead slow	149

Astern		Bow thruster	
Speed order	Sound pressure (dB)	Rotation (rpm)	Sound pressure (dB)
	ME* ¹ +G(MED)* ²		ME* ¹ +G(MED)* ²
Full	154	500	152
Half	154	1000	152
slow	152	1500	151

*¹Main engine, *²Generator (Main engine driving), *³Generator engine

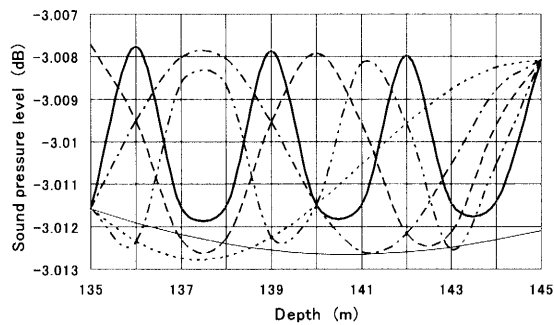


Fig. 3 Simulation of the interference of the direct wave and the reflected wave from sea bottom.

— 20 Hz - - - - - 200 Hz
 50 Hz - · - · - 600 Hz
 - - - - - 100 Hz ——— 1000 Hz

の値を示した。鈴木ら⁵⁾は130 dB~150 dBの放射水中音は魚を驚かせるとしている。これを適用すれば、南星丸がFull aheadで航走するとき、130 dBとなる距離は約380 m、140 dBとなる距離は約120 mとなる。遊泳する魚群は、これらの距離から逃避行動を起こしている可能性があることに注意しなければならない。

ここにおいて、航走時においても漂泊時と同様、放射水中音の直接波と海底反射波の干渉について検討する必要がある。今回の測定は供試船と測定船との最接近距離が30 mと近かったこと¹⁰⁾、及び同距離付近での測定データ長が10秒であったことなどにより、干渉による振幅変動の影響は漂泊中同様無視できた。

放射水中音のスペクトル

漂泊中における放射水中音の起因を検討する。一例と

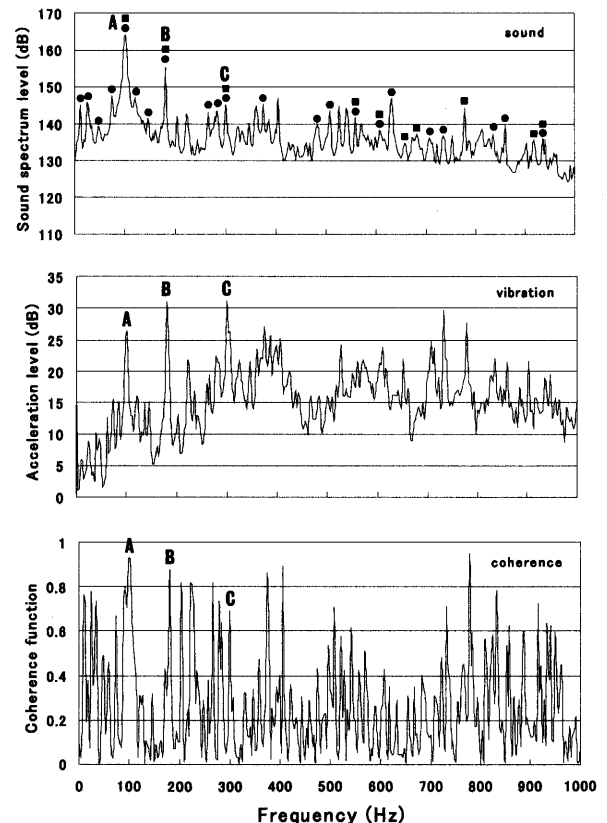


Fig. 4 Measured spectrum of underwater sound emitted by drifting Nansei-Maru and vibration acceleration of the hull which were measured simultaneously and the coherence function between them.

Some harmonics (line component spectrum) of basic frequency which was corresponded to main engine rotation were marked with ● (500 rpm), and to dynamo engine were marked with ■ (1200 rpm).

して、主機関回転数500 rpmで、発電機（主機駆動）と発電機関（1200 rpm）を同時に駆動した時の放射水中音のスペクトルレベル、船体振動の加速度レベル及び両者のコヒーレンス関数をFig. 4に示した。ここで主機関の基本周波数は8.33 Hz、発電機関の同周波数は20.0 Hzである。これらの値から、放射水中音に関してそれぞれの高次倍音に相当する極大値に印を付した。振動加速度においても、基本周波数の高次倍音に相当する周波数に極大値がみられた。また13 Hzが基本周波数であるポンプによると推察される高次倍音に極大値がみられたが、どのポンプであるのか特定できなかった。放射水中音の最大スペクトルレベル (A) は100 Hzにあった。これは主機関の12倍音であり、また発電機関の5倍音に相当する。次に大きな極大値は181 Hz (B) にあり、主機関の22倍音、発電機関の9倍音に極めて近い。このように両者の倍音周波数がほぼ合致したため、他の線スペクトルに比較して大きな値を示したと推定される。これは振動加速度レベルも同じ傾向であった。しかし300 Hz (C) において振動加速度レベルはBと同様であるにもかかわらず、音圧レベルはBより約10 dB小さな値を示した。これはコヒーレンス関数によく現われている。このように放射水中音スペクトルレベルは船体振動スペクトルレベルの大きさに必ずしも対応していないことが知見された。

これらの結果から、南星丸漂流中における放射水中音の主たる起因は、主機関と発電機関であることが裏付けられた。

航走中の一例としてHalf aheadの放射水中音スペクトルをFig. 5に示した。この時の各基本周波数は主機関10.83 Hz、発電機関20.0 Hz、プロペラ軸3.75 Hz、プロペラ15.0 Hzであった。これらの値から、それぞれの倍音に相当する極大値に印を付した。200 Hz付近以下の周波数帯域は、プロペラ回転によって生じるキャビテー

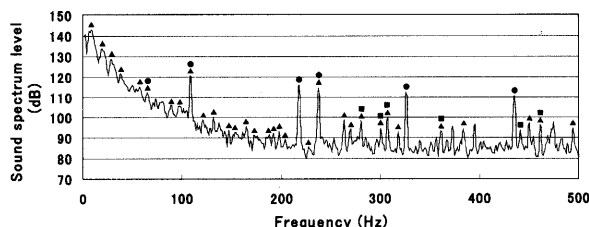


Fig. 5 Measured spectrum of underwater sound when Nansei-Maru is cruising of Half ahead at the distance of 30m from the hydrophone.

Some harmonics (line component spectrum) of basic frequency which was corresponded to main engine rotation were marked with ● (650 rpm), dynamo engine ■ (1200 rpm), propeller shaft ▲ (225 rpm).

ションや乱流による連続スペクトルと、プロペラ軸から発する線スペクトルが卓越し、両者が混在したパターンを示した。200 Hz以上の周波数帯域は主機関、プロペラ軸、発電機関の各倍音に相当する線スペクトルが卓越した。このように漂流中におけるスペクトルとの相違は200 Hz以下の周波数帯域に顕著に現れた。ここで航走によるドップラーシフトについて検討する。Half aheadの船速は、Table 2に示したように8 ktであり、データ長は最接近距離30 mに至る直前の10秒間であった。この結果、ドップラーシフトは50 Hzで0.1 Hz、100 Hzで0.2 Hz、500 Hzで1.1 Hzであった。Fig. 5に示したスペクトルの周波数には、各周波数に応じて、同シフトの影響が含まれている。しかし、それらの値は小さく、同シフトについては無視することができた。

次に前進航走中と後進航走中の各放射水中音スペクトルを重畳してFig. 6に示した。Slow aheadとHalf asternはTable 2に示したように、主機関回転数とプロペラピッチ角が同じで、船速もほぼ同一である。前進時には200 Hz付近まで連続スペクトルが明確に現れるが、後進時には150 Hz付近までで、かつ連続スペクトルは線スペクトルよりレベルが小さい傾向にあった。これは他の船速における前進、後進とも同様の傾向を示した。

バウスラスター500 rpmで作動した時の放射水中音スペクトルをFig. 7に示した。約100 Hz～350 Hzにかけて凸状の連続スペクトル分布パターンを示した。これは1000 rpm、1500 rpm時も同様であった。このパターンはバウスラスター使用時の特徴であると推定される。

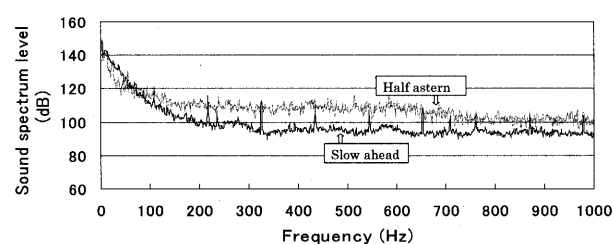


Fig. 6 Comparison of the measured sound spectrum of Slow ahead with that of Half astern.

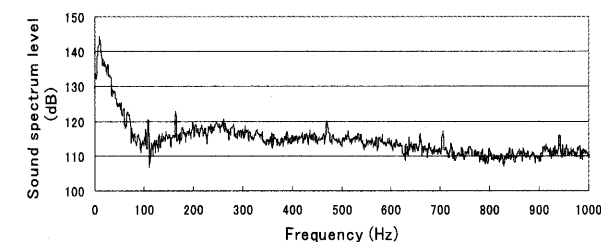


Fig. 7 Measured spectrum of underwater sound when the bow thruster (500 rpm) is in operating.

要 約

平成14年度に鹿児島大学練習船南星丸が建造された。本船は学生、研究者を乗せ各種調査及び実習を行っている。その一環として、世界の水産生物資源量調査の指標の1つとなっている計量魚群探知機を使用しての調査も実施されている。同魚群探知機は、船底より垂直方向に超音波ビームを発射するものであり、魚類等海洋生物が船舶からの放射水中音に驚き、当該船舶から遠ざかる逃避行動をとるとするならば、船底下に存在する魚類等は減少し、資源量を少なく評価する危険性がある。そこで南星丸が放射する水中音の実態を把握し、計量魚群探知機等を使用するに当たって、精確な資源量推定のための基礎資料を得ること目的として、放射水中音の測定を実施し、次のような知見を得た。

- ①漂泊中、船底直下10 mの距離において、音圧レベルは平均143 dBであった。主機関回転数の違いならびに発電機駆動の有無による音圧レベルの有意な差はみられなかった。
- ②航走中、南星丸から水平距離30 m離れた点において、Dead slow aheadの149 dBを除き、今回の各種条件下での全測定において150 dB～153 dBの値を示した。Full aheadで航走するとき、魚を驚かせると推定される音圧レベルの130 dBとなる距離は約380 m、140 dBとなる距離は約120 mとなった。遊泳する魚群はこれらの距離から逃避行動を起こしている可能性があることに注意しなければならない。
- ③漂泊中の放射水中音スペクトルは、主機関と発電機それぞれの基本周波数に相当する高次倍音の線スペクトルが卓越した。
- ④前進航走中の放射水中音スペクトルは、200 Hz付近以下の周波数帯域に、プロペラ回転によって生じるキャビテーションや乱流による連続スペクトルと、プロペラ軸から発する線スペクトルが卓越し、両者が混在するパターンを示した。
- ⑤後進航走中の放射水中音スペクトルは、④に比し、後進中には150 Hz付近までで、かつ連続スペクトルは線スペクトルよりレベルが小さい傾向を示した。
- ⑥バウスラスター作動中の放射水中音スペクトルは、約100 Hz～350 Hzにかけて凸状の連続スペクトルが現れる分布パターンを示した。

最後に、この測定を行うに当たり、協力いただいた当時環境情報科学講座大学院生の高嶋明子氏、同講座学生の田村彩氏及び南星丸乗組員に感謝する。

文 献

- 1) R.J. Urick (1978). 水中音響の原理 (土屋明訳, 西村実監修), 共立出版, 東京, pp.316-340.
- 2) 三橋邦宏, 上牟田千尋, 大橋弘隆, 田淵一郎, 野尻武生, 三浦俊樹, 末芳樹 (1982). 半水没型双胴船の水中雑音特性について. 三井造船技報, 114: 35-43.
- 3) 間庭愛信, 畠山良巳 (1975). 音響による魚群の誘致威嚇に関する研究 (4). 漁船研究技報, 28: 1-22.
- 4) 柴田恵司, 麻生幸則, 西之首英之 (1966). 旋網漁船の水中騒音 (予報). 日本航海学会誌, 35: 57-62.
- 5) 鈴木裕, 濱田悦之, 斉藤清隆, 間庭愛信, 白井靖幸 (1980). 船の発する水中音と海中生物への影響. 日本航海学会誌 (航海), 63: 25-31.
- 6) 藤田伸二, 山本勝太郎, 梨本勝昭 (1990). 沿岸漁場における背景雑音の解析. 日水誌, 56: 911-916.
- 7) 鄭龍晋, 松野保久, 藤枝繁, 山中有一 (1995). 漁船の海中への放射雑音. 日水誌, 61: 553-560.
- 8) 藤枝繁, 松野保久, 山中有一, 稲元忠弘 (1997). 停泊中の船舶から海中へ放射される雑音の干渉効果. 日水誌, 63: 213-221.
- 9) L.N. Liebermann (1948). Reflection of sound from coastal sea bottoms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 20: 305-309.
- 10) 藤枝繁, 稲元忠弘, 山中有一, 松野保久 (1998). 航行中の船舶から放射される海中雑音の干渉効果. 日水誌, 64: 48-55.