漁船の海中への放射雑音*1

鄭 龍 晋, 松 野 保 久, 藤 枝 繁, 山 中 有 一

(1994 年 12 月 6 日 受付)

The Underwater Noise Emitted by Fishing Boats

Yong-jin Chung,*2 Yasuhisa Matsuno,*3 Shigeru Fujieda,*3
and Yuichi Yamanaka*3

The underwater noise emitted by fishing boats is one of the main noise sources in coastal fishing grounds. This paper intends to investigate the underwater noise emitted by fishing boats, by means of measuring both drifting and cruising noise for small trawlers and medium purse seiners.

The spectrum of noise when drifting showed some harmonics (line component spectrum) of basic frequency which corresponded to the main engine and generator revolution pitch. The noise at cruising showed a powerful continuous component spectrum above 50 Hz frequency zone to the propeller influence as well as line components spectrum. It dominated when applied to full speed ahead and astern. The sound spectrogram of underwater noise emitted by fishing boats when cruising showed furthermore doppler phenomenon and interference. These functions at cruising were influenced by distance from noise source, depth, reflection number, main engine and generator revolution, and cruising speed.

キーワード: 放射雑音, 漁船, パワースペクトル, 海中雑音, トロール, 旋網

船舶から放射される海中雑音は、海洋中における主要な雑音の一つである。船舶は、主機など多くの機械類を装備し、それらが発する振動・騒音は、海中に雑音となって放射される。また海中で回転するプロペラは、キャビテーション気泡を発生させ、前者と異なる特性を持つ雑音を生む。Urlick¹⁾によれば、複雑な発生機構をもつ船舶の海中への放射雑音は、線スペクトルを示す音色のある雑音 (tonal noise) と、連続スペクトルを示す広帯域雑音 (broad band noise) の2種類が広帯域にわたって合成されたものであるとし、前者を機械雑音、後者をプロペラ雑音の特徴であるとしている。

これまで船舶の放射雑音の研究は、主に海中で使われる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放射雑音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。沿岸漁場において、船舶の放射雑音など水中音響が魚類に

与える影響を考える時、魚の聴覚特性を解析するとともに、その魚の棲息する海域の音響環境を十分に把握しておく必要がある。筆者らは、これまで養殖場の水中音響環境⁷⁾や、その生簀内で群泳する魚の遊泳音^{8,9)}について解析を行ってきたが、今回は沿岸漁場における漁船の放射雑音について測定解析するとともに、魚の放射雑音に対する逃避行動との関連も合わせて検討した。

方 法

供試船および測定海域 漁船の放射雑音の特性を把握するために、Table 1 に示す本学練習船「南星丸」(以下 A 丸)、有限会社海盛水産所属中型まき網漁船の網船 (B 丸)、灯船 (C 丸)、運搬船 (D 丸) および灯船 (E 丸) の5隻の供試船を用いて、対水速力のない場合 (停船時)、および対水速力のある場合 (航走時) の放射雑音を測定した。A 丸は、可変ピッチプロペラを装備し主機回転数 1000~1100 rpm、減速比 3.47:1 で翼角により船速を調整した。また B, C, D および E 丸は、固

*1 平成6年度日本水産学会秋季大会(三重)において口頭発表した。

*2 鹿児島大学大学院連合農学研究科 (The United Graduate School of Agricultural science, Kagoshima University, Kagoshima 890, Japan)。

*3 鹿児島大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Kagoshima 890, Japan)。

Table 1. Principal particulars of each fishing boat

Species	Fishing boat				
	A	B	C	D	E
	Small trawler Mansei-maru	Medium purse seiner			
		Netting boat	Light-boat	Transport-boat	Light-boat
Hull	Steel	FRP	FRP	FRP	FRP
G.T (t)	83	19	19	19	11
Length (m)	26	16.99	19.41	19.63	14.1
Width (m)	5.7	5.38	4.38	4.49	3.14
Height (m)	2.55	1.8	2.01	1.38	1.13
Main Engine	Diesel 400 PS	Diesel 190 PS	Diesel 190 PS	Diesel 160 PS	Diesel 160 PS

定ピッチプロペラで、船速は主機回転数により調整した。

各供試船の測定海域を Fig. 1 に示す。A 丸は、鹿児島湾奥海域中央部 (31°39.8'N, 130°42.7'E を中心とする海域；a)，まき網漁船 B, C, D および E 丸は、鹿児島県阿久根市折口沖 (32°03.4'N, 130°09.2'E を中心とする海域；b) にて測定を行った。湾奥海域は、水深が 135 m と深く、四方を陸に囲まれた穏やかな海域で、測定時の天気は快晴、風力階級は O (calm) であった。また阿久根市折口沖は、水深 30~40 m の東シナ海に開けた海域で、測定時の天気は小雨で風力階級 1 (light air), うねり階級 1 (low swell) であった。なお両海域共、測定時周辺には航行する他の船舶は視認できなかった。

Fig. 1. Locations of measuring the underwater noise emitted by fishing boats (a: Small trawler, b: Medium purse seiner).

Table 2. Measurement conditions of fishing boats at the drifting

Fishing boats	A	C	E
Main engine revolution (rpm)	600	1100	950
Generator revolution (rpm)	1720	1800	600

た。

収録方法 船内機械類から船殻を経て海中へ放射される雑音の基本的な特徴を得るために、A 丸の停船時の放射雑音を測定した。またまき網漁船のうち灯船は、主機をアイドリング状態でドリフトさせて集魚を行うことから、集魚時の放射雑音の特徴を得るために灯船 C, E 丸でも測定を行った。これら停船時の測定条件を Table 2 に示す。測定は、Fig. 2 に示すように供試船の主機直下水深 10 m の位置にハイドロフォン ST-1020 (沖電気工業製) を設置し行った。さらに船舶機械をすべて停止し、両海域の背景雑音の測定も合わせて行った。

また航走によって発生する放射雑音の周波数特性と音圧変化を得るために、A, B, C および D 丸の航走時の放射雑音を測定した。これら航走時の測定条件を Table 3 に示す。収録は、ハイドロフォンを船側から水深 10 m に垂下した錨泊中の測定船にて行った。供試船は、Fig. 3 に示すように測定船との最接近距離 20~40 m で航過できる針路で直進させた。なお直進航行区間は約 1.6 マイル、そのうち測定区間は、測定船最接近前後 0.5 マイルの計 1 マイルとし、測定開始地点を 0.5、終了地点を +0.5、および最接近時を 0 で示した。測定船と供試船の距離測定には、供試船のレーダおよび精密測

Fig. 2. Set-up to measure noise when ship is drifting.

距離を用いた。

測定に際しハイドロフォンは、鉄製枠内にゴムコードで吊し、またハイドロフォンケーブルは、フロート浮力

Fig. 3. Method of measuring the underwater noise of fishing boat at cruising.

で海中に浮かせることにより船体振動の影響を低減させた。さらに水中音圧計およびデータレコーダーは、規定の直流電源により作動させたので交流誘導雑音は皆無であった。ハイドロフォンで受波した放射雑音は、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。得られた受波信号は、メインアンプで増幅後、 $1 \mu\text{Pa}$ を基準とした音圧レベルに換算した値でレベルメーターに送り、10 秒間隔で読み取った。また平行してデータレコーダ RD-101T (TEAC 製) にも記録した。収録した放射雑音は、後に信号解析装置 SA-74 (リオン製) により周波数解析し、1 Hz の帯域幅で $1 \mu\text{Pa}$ を基準値としたスペクトルレベルで表示した。なおスペクトルの積算平均処理回数はすべて 10 回とした。

結果および考察

停船時の放射雑音 Table 2 で示した測定条件での停船時の A, C および E 丸から放射される 200 Hz 以下の放射雑音のスペクトルレベルを Fig. 4 に示した。また同時に、各測定条件の主機・原動機回転数の基本周波とその高調波に印を付した。A 丸では 600 rpm で 10 Hz (○), 1100 rpm で 20 Hz (●) およびその 1/2 を基本周波とする高調波が見られる。このようにプロペラによる雑音がない場合、その放射雑音は、船殻を伝って海中へ放射される船内の主機の振動が主となるため、その回転数を基本周波とする高調波が線スペクトルとして現われる。また原動機も同時に運転した場合、その線スペクトルは複雑となる。特に主機回転数と原動機回転数との比が約 2 : 3 (1100 rpm : 1720 rpm) となる場合、20

Table 3. Measurement conditions of fishing boats at the cruising

Fishing boats	A				B		C	D	
	Full	half	slow	dead slow	astern	full	full	full	slow
Speed (knot)	9.9	7.7	5.3	3.4	2.1	11	15	15	7.5
Main engine revolution (rpm)	1100	1100	1000	1000	1000	1350	1200	1500	700
Propeller pitch angle (°)	19	12	7	4	-7				
Generator revolution (rpm)	1720	1720	1720	1720	1720		1800

Fig. 4. The sound spectrum of underwater noise at drifting for fishing boat A, C, and E.

Some harmonics (line component spectrum) of basic frequency which was corresponded to revolution of main engine were marked with ○ (600 rpm.), ▽ (950 rpm.), ● (1100 rpm.), and of dynamo engine were marked with □ (1720 rpm.), ■ (1800 rpm.).

20 Hz (●)と30 Hz (□)を基本周波とする高調波成分が重なり合い、線スペクトルが強調される。また灯船C, E丸の集魚時ではA丸同様線スペクトルが主となるが、それぞれの船内機械の回転数により放射雑音のスペクトルパターンは大きく異なる。

航走時の放射雑音 次にA丸が主機回転数(1100 rpm)でプロペラ翼角にて船速を調整し航行した場合、海中に放射する1000 Hzまでの雑音の周波数特性をFig. 5に示した。各速力におけるそれぞれのスペクトルは、A丸と測定船の距離が50 mにある時の例である。また主機、原動機の回転数が航走時と同じ状態である場合の停船時の放射雑音も示した。停船時に見られた線スペクトル成分は、航走時においても同様20 Hz~200 Hzに現われた。しかしfull航走時には50 Hz~200 Hz、後進時には50 Hz以上の周波数帯に強い連続スペクトルが現われ、他と異なった。Urick¹⁾によるとプロペラキャビテーションによって発生する雑音は、通常

Fig. 5. The sound spectrum of underwater noise when fishing boats are cruising A at the distance of 50 m from the hydrophone.

100 Hz~1000 Hzの間に主ピークを持つ連続スペクトルであるとしている。よってこの連続スペクトル成分が強くなった時、プロペラキャビテーションが大きい可能性が高い。

次にD丸を例にして、接近・通過に伴う放射雑音のスペクトルレベルの時間変化(スペクトログラム)をFig. 6に示した。20 Hz~200 Hzに見られる線スペクトル成分(a)は、比較的遠距離から存在し、その周波数成分は、接近距離に関係なく一定でスペクトルレベルのみ増加した。また100 Hz~400 Hzに見られる連続スペクトル成分(b)は、最接近付近で急激にレベルが増加するが、そのレベル増加の周波数成分は、漁船により異なる傾向がみられた。さらに最接近付近において640 Hz付近に線スペクトル成分のドブラー現象(c)も確認された。また最接近点への接近に伴い、連続スペクトル成分の低周波側へのシフト傾向(d)が見られた。この現象は、ハイドロフォンが音源から直接伝搬する直接波の他に、伝搬距離の異なる海底・海面で反射した間接波を同時に受波するために生じる干渉である。¹⁰⁾ スペクトログラム上に見られるこの干渉現象は、航走により直接波と間接波の伝搬距離差が変化するため、それによる位相差が周波数によって異なり、接近に伴い低周波側へのシフトする干渉縞となる。例えば時間変化による位相のずれがない場合、干渉縞は一定周波数に等間隔に現われる。しかし船舶が接近するような伝搬距離差が変化する場合、波長が短い高周波ほど位相の変化が激しく、逆に低周波ほど位相の変化が鈍いため、接近に伴い低周波側にシフトする干渉縞が現われる。これは線スペクトルレベルでもみられ、接近に伴いこの干渉を生じながら増加す

Fig. 6. The sound spectrogram of underwater noise when fishing boats are cruising D (upper) and the sound spectrum at the closest point of approach (lower) of fishing boat D.

- a: line components spectrum.
- b: continuous component spectrum.
- c: doppler phenominon.
- d: interference.

る。

Fig. 7はスペクトルの時間変化をA, B, CおよびD丸で比較したものである。各漁船とも線スペクトル, 連続スペクトル, ドップラー現象および直接波・間接波による干渉縞が見られるが, これらの現象が最も強く現われたのは, D丸のfull航走時であった。またB, C丸は同型の主機を搭載しているが, 船型が異なるため, スペクトルの時間変化は若干異なった。固定ピッチプロペラを使用するB, CおよびD丸では主機回転数により船

速を変えるため, 船速によって線スペクトルの周波数, スペクトルレベルとも変化し, 特にslow航走時では連続スペクトル成分が低く, 接近に伴うスペクトル変化は鈍い傾向にあった。可変ピッチプロペラを使用するA丸は, 主機回転数が一定のため, 海中雑音の主成分となる線スペクトルの周波数は船速にかかわらず同一であった。しかしプロペラキャビテーションに起因する連続スペクトル成分は, 船速により異なり, 主に船速の速い時および船舶が著しく接近した時に顕著に現われた。なお

Fig. 7. The comparison of sound spectrogram when fishing boats are cruising A, B, C and D.

A_1 is full speed of fishing boat A, A_2 is half, A_3 is slow and A_4 is dead slow. B, C is full speed of fishing boat B and C. D_1 is full speed of fishing boat D and D_2 is slow.

Fig. 8. The sound pressure change as functions of approaching distance.

O: closest point of approach. A: Real line shows full speed cruising and other lines show half, slow and dead slow speed A, B, C, D: Continuous line shows go cruising and dotted line shows return cruising.

直接波と間接波の干渉縞は、両波の伝搬距離の違いによる位相差によって生じるため、測定海域の水深、反射回数および供試船の船速等によって複雑に変化する。例えばA丸の干渉縞がB, CおよびD丸に比べ密なのは水深が135 mと深く、わずかな航走距離で位相差が変化するためである。

Fig. 8に示す接近に伴うオーバーオール値の時間変化は、主機回転数が一定であるA丸では、船速に関係なく顕著な増加傾向が見られた。しかし主機回転数を減じたD丸の低速時では、接近に伴うレベルの増加は緩慢であった。

このように漁船の放射雑音は、主機及び原動機の出力ならびに回転数により特徴付けられ、さらに航走時にはプロペラ雑音加わる。特に可変ピッチプロペラ船では、主機回転数が同一のため、低速時においても高速時と同レベルの放射雑音を発生し、プロペラ雑音のレベルが船速によって異なる。しかし固定ピッチプロペラを持つ小型漁船では、船速によって主機回転数が大きく変化するため、放射雑音の周波数特性、音圧とも大きく変化する。船速が早くなれば放射雑音のレベルも大きくなる。

放射雑音に対する魚の逃避行動 漁船からの放射雑音に対する魚の行動に関する研究は、間庭、畠山、³⁾ 柴田

ら⁴⁾および鈴木ら⁵⁾によって行われてきた。また魚の聴覚能力に関する研究¹¹⁻¹³⁾も行われており、ここではそれらを参考に放射雑音に対する魚の逃避行動について検討する。

間庭、畠山³⁾によるとイカの集魚に効果がある音は、船舶の後進音で、その音は100 Hz～2 kHz成分が強く、320 Hzにピークを持つ。しかしここでは線スペクトル成分と連続スペクトル成分の関係が明確に示されていないため、集魚効果が後進音のどのような成分に起因するか不明である。しかし柴田ら⁴⁾は、漁獲効率の悪い船は線スペクトル成分が顕著であるとし、音色が魚の逃避行動に影響を与えていることを示唆している。鈴木ら⁵⁾によると130 dB～150 dBの放射雑音は魚を驚かせ、その音を当てた直後に魚は数m沈下した。また魚の周波数弁別能力には音圧の影響はないとされることから、¹³⁾例えば音圧140 dBで威嚇効果が生じるとした場合、逃避行動を起す距離はFig. 8より、full航走時のA, B丸では約100 m, C丸で約60 mおよびD丸で約160 mと漁船により異なる。さらにslow航走時のD丸では威嚇効果はないと考えられる。

旋網操業を例に上げると、灯船は主機をアイドリング状態で集魚するため、Fig. 4に示すような線スペクトル

成分で示される唸り音を海中に放射する。また高速で網を投入する網船およびその周囲を航行する運搬船は、Fig. 7に示すような航走による雑音を放射するため、数隻で操業するまき網操業時では、複雑な海中雑音となっていると考えられる。特に灯船による集魚時、海底から浮上したアジが漁船D丸の接近によって沈下する例が魚探機の記録から確認されている。この現象は、灯船の放射雑音（水深10 mで音圧約150 dB）のレベルが大きいため、約30~40 mの距離を隔ててslowで接近通過するD丸の放射雑音（距離約40 mで128 dB）のレベルによる威嚇効果であるとは言い難い。しかしキングヨ,¹¹⁾ マダイ¹²⁾では、SN比が20 dB以上あればマスキングの影響はないとの報告もあり、もし魚に音色に対する識別能力あるいは好き嫌いがあるとすれば、この逃避行動の起因は、漁船D丸の接近に起因する可能性がある。これはさらに詳しい魚の聴覚特性の検討に待たねばならない。また旋網操業その他各種操業中においても、航走による放射雑音のみならず、漁具によっても雑音は発生する。^{14,15)} 西ノ首¹⁴⁾によると漁船の操業形態により主音源が異なることが確認され、漁船の放射雑音のみが操業中における主要雑音とは言い難い。よって今後更に多くの種類の漁船、異なる操業形態による海中への放射雑音と魚の聴覚特性とを関連させ、魚群の逃避行動について検討を加えていく予定である。

以上をまとめると漁船の放射雑音は、主機および原動機の出力ならびに回転数により特徴付けられる線スペクトル成分、および航走時に発生するプロペラ雑音による連続スペクトル成分が主成分となり、船舶およびその航走条件により特徴付けられ、また航走時では、音源との距離、水深、反射回数および船速等の外的要因によりドップラー現象、干渉現象が起き、また音圧も変化する。

終わりに本実験を行うにあたり深い御理解と協力下された有限会社海盛水産野村義也氏に感謝する。また、測定に際し多大な御協力、御助言をいただいた海盛丸船団

並びに南星丸両乗組員に感謝する。さらに鹿児島大学水産学部漁船航海学講座の上水幸治氏、渡瀬武久氏を始めとする学生諸君の労を多とする。ここに御礼申し上げる。

文 献

- 1) R. J. Urlick: 水中音響の原理 (土屋 明訳, 西村 実監修), 共立出版, 東京, 1978, pp. 316-340.
- 2) 三橋邦宏, 上幸田千尋, 大橋弘隆, 田淵一郎, 野尻武生, 三浦俊樹, 末 芳樹: 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, (1982).
- 3) 間庭愛信, 畠山良己: 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 (1975).
- 4) 柴田恵司, 麻生幸則, 西ノ首英之: 旋網漁船の水中騒音(予報). 日本航海学会誌, 35, 57-62 (1966).
- 5) 鈴木 裕, 濱田悦之, 斎藤清隆, 間庭愛信, 白井靖幸: 船の発生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 (1980).
- 6) 藤田伸二, 山本勝太郎, 梨本勝昭: 沿岸漁場における背景雑音の解析. 水誌, 56, 911-916 (1990).
- 7) 松野保久, 藤枝 繁, 鄭 龍晋, 山中有一: 鹿児島湾奥養殖場における生簀内の水中音. 水産海洋研究, 58, 11-20 (1994).
- 8) 藤枝 繁, 松野保久, 山中有一, 鄭 龍晋, 岸本 力: 養殖生簀内における魚群遊泳音の特徴. 鹿児島大学水産学部紀要, 42, 1-9 (1993).
- 9) 藤枝 繁, 松野保久, 山中有一, 鄭 龍晋: ゼロクロッシング法による魚群遊泳音の周期解析. 水誌, 60, 201-205 (1994).
- 10) 川上連三, 小浜俊一, 江藤和夫: 周波数分析における船舶航走音の干渉模様について. 日本音響学会講演論文集, 125-126 (1971).
- 11) W. N. Tavolga: Signal/noise ratio and the critical band in fishes. *J. acoust. Soc. Am.*, 55, 503-505 (1974).
- 12) Y. Hatakeyama: Masking effect on the hearing of red sea bream, *Pagrus major*, by ambient noise. *Int. J. Aqu. Fish. Technol.*, 1, 271-277 (1989).
- 13) R. R. Fay: Intensity discrimination of pulsed tones by the goldfish (*Carassius auratus*). *J. acoust. Soc. Am.*, 85, 500-502 (1989).
- 14) 西ノ首英之: 漁船および網漁具の操業中に発する水中騒音について. 長崎大学水産学部研究報告, 29, 91-102 (1970).
- 15) 肥後伸夫: 水中音響と底びき網漁業. 海洋科学, 16, 297-303 (1984).