

鹿児島港周辺海域の水中音環境

藤枝 繁*・稲元忠弘**・山中有一*・松野保久*

The Underwater Sound Environment around the Kagoshima Port

Shigeru FUJIEDA*, Tadahiro INAMOTO**,
Yuichi YAMANAKA*, and Yasuhisa MATSUNO*

Abstract

The Kagoshima Port is located at the west of Sakurajima Strait in the Kagoshima Bay, as a main port to south west islands, Japan. We report the underwater sound environment at seven stations around the Kagoshima Port. Recorded underwater sounds were analyzed by the power spectrum (0~2kHz) shown as the spectrogram and as 1/3 octave band analyses (32Hz~1kHz).

The characteristics of underwater sound environment in the heavy traffic area of the port were revealed as that cruising vessels emitted main noise sources. When the ferry boat left and approached the quay, the temporal change of sound pressure level showed "two peaks curve" at north of Kamoike Port off 0.3 mile. Goahead and astern noise by engine order of ferry boat were emitted to this area because of open port to the off shore. Especially the astern noise at the leaving port made sharp increase at 17dB in 500Hz and 1kHz. The noise with sharply increasing sound pressure level was also caused by cruising jetfoils, high speed fishing boats and pleasure boats. Underwater sound emitted by cruising vessels made interference in shallow water area. In the narrow strait, sound pressure level was higher than the other area.

1. はじめに

鹿児島湾北西部の桜島水道西側に位置する鹿児島港は、日平均約150隻の船舶が出入港する重要港湾であり、特に薩南・奄美諸島および沖縄に至る離島航路の基地として重要な役割を果たしている。鹿児島港に出入港する船舶の種類には、離島からの大・中型定期フェリーやジェットホイルなどの高速船、桜島や大隅半島を結ぶ定期フェリー、不定期貨物船および近海鯷魚船等がある。また港内には小型漁船、プレジャーボート、周辺養殖場への給餌漁船、港湾工事船および油槽船等が頻繁に通航し、市営海づり公園や急潮流の桜島

水道には人工魚礁が点在することから、海上交通路と漁場が隣接する海域となっている。

筆者らは鹿児島湾を中心に沿岸漁場における水中音環境の基礎的研究を行ってきた（例えば、鄭ほか、1995、藤枝ほか、1996）。その結果、平坦な海底が広がる浅海において強い音響エネルギーを持つ船舶の航走雑音を受波した場合、独特の干渉現象（BACHMAN and KAYE, 1983, 鄭ほか, 1995, 藤枝ほか, 1998）が生じることがわかった。これは海面と海底の両境界面間に音波がトラップされる浅海サウンドチャンネルによる浅海特有の現象のため、特に鹿児島港周辺のように船舶交通量が多い海域では船舶の航走雑音による急激な音圧変化と共に重要な水中音環境変化の要因となると考えられる。

ここでは船舶交通による影響を強く受ける鹿児島港周辺海域漁場の水中音環境について、魚類の可聴周波数範囲である2kHz以下に注目してその特徴を検討した。

1997年8月7日受付

1997年11月5日受理

* 鹿児島大学水産学部

Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Kagoshima 890-0056, Japan

** 鹿児島大学水産学部練習船南星丸

Training ship "Nansei-Maru", Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Kagoshima 890-0056, Japan

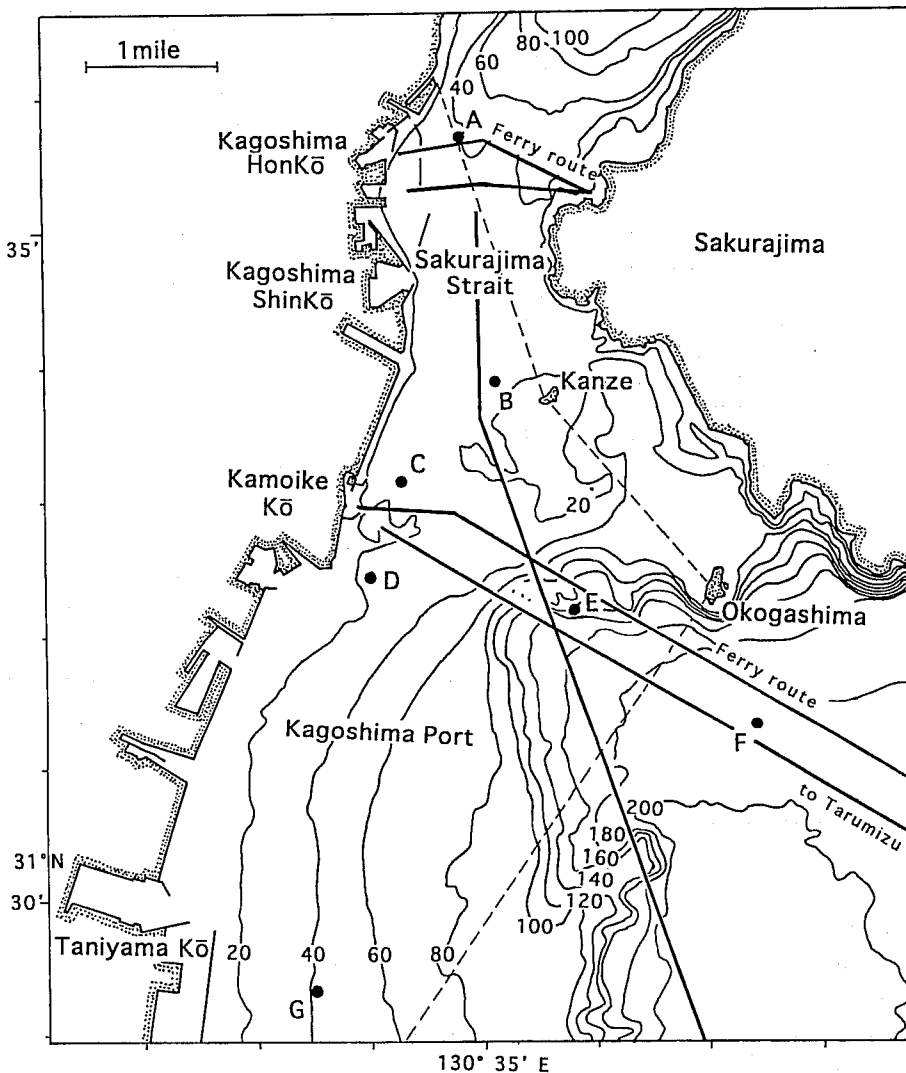


Fig. 1. Location and bathymetric map of the observation stations (A~G) around Kagoshima Port. Numbers on the contour lines show water depth in meters, bold solid lines show the cruising lines of ferry boats and vessels and broken line shows the harbor limit. A: 0.3 mile east of Kagoshima main Port, B: Center of Sakurajima Strait, C: 0.3 mile north of Kamoike Port, D: 0.5 mile south of Kamoike Port, E: 1 mile west of Okogashima, F: 1 mile south of Okogashima, G: 1 mile east of Taniyama Port.

2. 測定方法

鹿児島港周辺海域の7点 (Fig. 1) において海中雑音の測定を Table 1 に示す日時および測定条件で実施した。

水中音の測定は、藤枝ほか (1996) と同じ方法を用いた。その概要を以下に示す。海中雑音の時間変化の測定は、鹿児島大学水産学部練習船「南星丸」(83トン) を測定点に錨泊させ、主機、補機および航海計器

等すべての機器を停止した状態で、水平方向に無指向性となるように鉄製枠に取り付けたハイドロホン ST-1005 (沖電気工業製) を船側から測定水深に吊り下げて行った。ハイドロホンで受波した海中雑音は、船上のプリアンプ ST-80A (沖電気工業製) を介して水中音圧計 SW-1020 (沖電気工業製) に導き、メインアンプで増幅後、データレコーダ RD-101T (TEAC 製) に記録した。なお測定時、水中音圧計およびデー

Table 1. The observation conditions of underwater noise around the Kagoshima Port

Station	No.	Date	Time (JST) (h:m)	Depth (m)	Hydrophone depth (m)	Wind Speed (m/s)	Wind Direction	Weather	Velocity of Tidal Stream(knot)
East of Kagoshima main Port	A	1996.8.2	12:16~12:56	39	5	- ^{*1}	-	bc ^{*2}	-
Center of Sakurajima Strait	B-1	1996.11.19	12:16~12:48	38	10	8	NW	b ^{*3}	0.5
	B-2	1996.11.19	13:12~13:20	38	34	8	NW	b	0.5
North of Kamoike Port	C	1996.10.15	11:59~13:17	24	10	7	NW	b	-
South of Kamoike Port	D-1	1997.4.23	12:49~13:22	24	5	6	N	bc	0.8
	D-2	1997.4.23	13:54~14:32	24	24	6	N	bc	0.8
West of Okoga Sima	E-1	1996.10.29	11:04~11:29	147	10	2	W	c ^{*4}	0.3
	E-2	1996.10.29	11:45~12:05	147	100	2	W	c	0.3
South of Okoga Sima	F-1	1996.11.7	12:35~12:48	183	10	3	W	b	0.1
	F-2	1996.11.7	13:01~13:16	183	100	3	W	b	0.1
East of Taniyama Port	G	1996.10.14	14:02~14:27	44	10	4	W	bc	-

-^{*1}: no data, bc^{*2}: fine but cloudy weather, b^{*3}: fine weather, c^{*4}: cloudy weather

タレコーダは、規定の直流電源により作動させ、交流誘導雑音を防止した。また収録には、水中音圧計内のカットオフ周波数10Hzのハイパスフィルタ、および10kHzのローパスフィルタを使用した。

収録した海中雑音は、後日研究室にて再生し、信号解析装置SA-74(リオン製)を用いて周波数レンジDC~2kHz、帯域幅5Hz、積算平均処理回数10回、1μPaを基準値として10秒間隔で周波数解析を行った。スペクトルデータはパソコンに転送し、1Hzの帯域幅のスペクトルレベルに換算した後、横軸を時間、縦軸を周波数としたスペクトログラム(Fig. 2)を作成した。また同スペクトルデータを用いて1/3オクターブバンドレベル(以下、バンドレベルという)の時間変化(Figs. 3~6)も求めた。なお図には1オクターブ間隔に中心周波数32, 63, 125, 250, 500Hzおよび1kHzのみを示す。

3. 解析結果

測定点A~Gにおける海中雑音の時間変化をFig. 2のスペクトログラムに、また航走船舶の種類をTable 2に示す。これより各測定中、船舶の航走雑音によって水中音環境は大きく変化し、特に40m以浅のA~D, Gでは1.5kHz付近までのスペクトログラム上に縞模様が見られる。これは船舶からの海中放射雑音の直接波に海底・海面で反射しながら伝搬する間接波が干渉するために生じるものであり、周波数によって位相のずれが異なるために縞模様となって現われる。以下に各測定点における海中雑音の特徴について説明する。

鹿児島本港沖Aの深さ5mにおける1/3オクターブバンドレベルの時間変化をFig. 3に示す。静寂時(12時20分~24分)、125Hz以上のバンドレベルは110~115dBを示すが、32, 64Hzのバンドレベルは船舶の有無に関係なく115~135dBと大きく増減する。一方当点は0.1マイル以内を桜島フェリーが通航するため、125Hz以上のバンドレベルはフェリーa, b, c, fおよび貨物船dの接近に伴って10~15dB増加し、スペクトログラム(Fig. 2, A)上のc, e, fに干渉模様が見られる。また高速で航走する小型漁船eの接近に伴うバンドレベルの変化は、125Hzで2分間に4dB増加するのに対し、1kHzでは25dBと周波数が高いほど大きくなる。しかし速力が速いためにスペクトログラム上では干渉模様は通過後のわずかな間しか現われない。

桜島水道中央部の神瀬沖Bの深さ10mにおける1/3オクターブバンドレベルの時間変化をFig. 4に示す。静寂時(12時19分~21分)のバンドレベルは、32~125Hzで約110dB, 250Hz, 500Hzで約118dBを示す。しかし狭水道中央部の当点では船舶が0.1マイル以内を通航するため、他海域に比べ船舶の接近に伴うバンドレベルの増加が激しく32, 125Hzでは約35dBも増加し、最大音圧は145dBにも達する。また砂利運搬船hの航走雑音は、最接近距離がジェットホイルgの0.1マイルや離島航路フェリーiの0.08マイルに比べ0.3マイルと遠いが、32Hzのバンドレベルは145dBと高く、速力が遅いため持続時間も約3.5分間と長い。

鴨池港北方0.3マイル沖C深さ10mにおける1/3オク

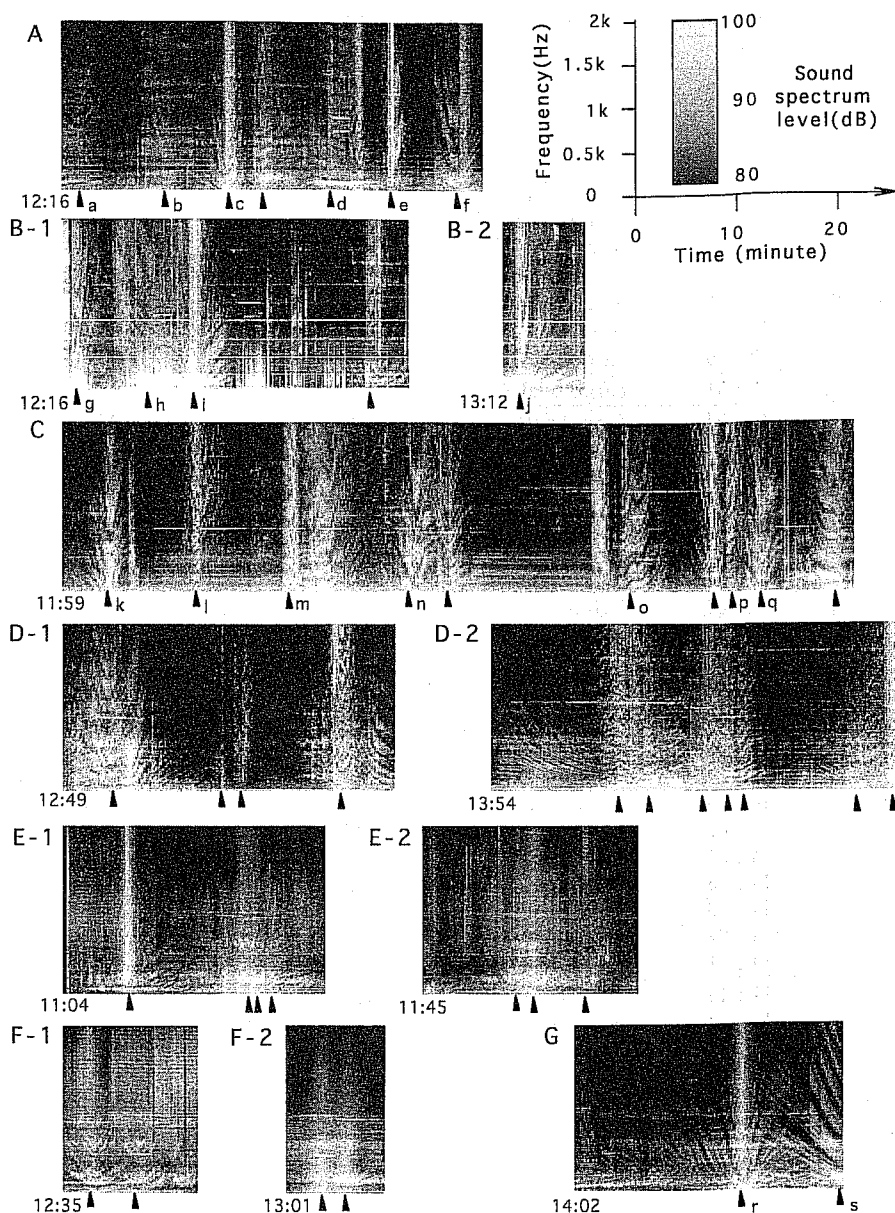


Fig. 2. Sound spectrograms of the underwater noise at the stations A~G. The closed triangle shows the closest point of approach (CPA) of cruising vessels. Gray scale shows spectrum level (80~100dB) in 0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$.

ターブバンドレベルの時間変化を Fig. 5 に示す。32, 63Hz のバンドレベルは、船舶の航走に関係無く約140 dB, 約130dB で一定であり、静寂時(12時40分~52分)の125Hz以上のバンドレベルは118~120dBとA, Bに比べやや高い値を示す。フェリー m, o の出港時のバンドレベル変化は、急峻なピークになだらかなピー

クが続く二山型を示し、フェリー k, n, q の入港時はこれとは逆になだらかなピークに急峻なピークが続く二山型を示す。両者の急峻なピークは250Hz以上に現われ、特に500Hz, 1kHzでは急激に17dB増加する。このような変化はジェットホイル l, p の航走雑音にも見られ、250Hzで5dB, 1kHzで15dB増加す

Table 2. Type of passed vessels during the observation

Station		TCPA ^{*1}	Vessel's type	G/T ^{*2}	Course	CPA ^{*3}
A	a	12 : 19	ferry boat(S) ^{*4}	993	E	0.4
	b	12 : 27	ferry boat(S)	655	E	0.1
	c	12 : 32	ferry boat(S)	586	W	0.05
		12 : 35	fishing boat	— ^{*6}	N	0.05
	d	12 : 35	cargo boat	498	N	0.1
	e	12 : 47	fishing boat	—	N	0.05
f	12 : 55	ferry boat(S)	586	E	0.05	
B-1	g	12 : 17	jetfoil	166	N	0.1
	h	12 : 25	cargo boat	681	N	0.3
	i	12 : 28	ferry boat	2213	N	0.08
		12 : 46	cargo boat	498	N	0.1
B-2	j	12 : 01	cargo boat	498	N	0.1
C	k	12 : 04	ferry boat(T) ^{*5}	1498	W	0.1
	l	12 : 13	jetfoil	166	N	0.6
	m	12 : 25	ferry boat(T)	1498	E	0.1
	n	12 : 34	ferry boat(T)	1503	W	0.1
		12 : 38	tag boat	—	N	0.05
	o	12 : 57	ferry boat(T)	1503	E	0.1
		13 : 04	liner	64	S	0.05
	p	13 : 05	jetfoil	166	S	0.6
	q	13 : 08	ferry boat(T)	1196	W	0.1
		13 : 15	liner	776	N	0.8
D-1		12 : 58	cargo boat	499	N	0.05
		13 : 06	liner	64	S	0.5
		13 : 07	jetfoil	166	S	1
		13 : 18	ferry boat(T)	1503	W	0.5
D-2		14 : 06	cargo ferry	903	N	1
		14 : 07	liner	776	N	1
		14 : 14	cargo ferry	2213	S	1
		14 : 15	ferry boat	3392	N	1
		14 : 16	ferry boat(T)	—	W	0.5
		14 : 24	cargo ferry	—	N	1
		14 : 41	cargo boat	—	S	0.1
E-1		11 : 10	chemical tanker	499	S	0.1
		11 : 24	ferry boat(T)	1473	E	0.2
		11 : 24	ferry boat(T)	1498	W	0.3
		11 : 26	tanker	355	S	0.1
E-2		11 : 55	ferry boat(T)	1503	W	0.3
		11 : 56	ferry boat(T)	1498	E	0.2
		12 : 01	jetfoil	163	N	—
F-1		12 : 38	ferry boat(T)	1196	W	0.3
		12 : 42	ferry boat(T)	1498	E	0.3
F-2		13 : 04	ferry boat(T)	1503	W	0.3
		13 : 07	ferry boat(T)	1473	E	0.3
G	r	15 : 39	fishing boat	1297	SE	0.1
	s	14 : 27	fishing boat	860	NW	0.05

TCPA^{*1} : time to closest point of approach

G/T^{*2} : gross tonnage(ton)

CPA^{*3} : closest point of approach

ferry boat(S)^{*4} : Sakurajima ferry

ferry boat(T)^{*5} : Taramizu ferry

—^{*6} : no data

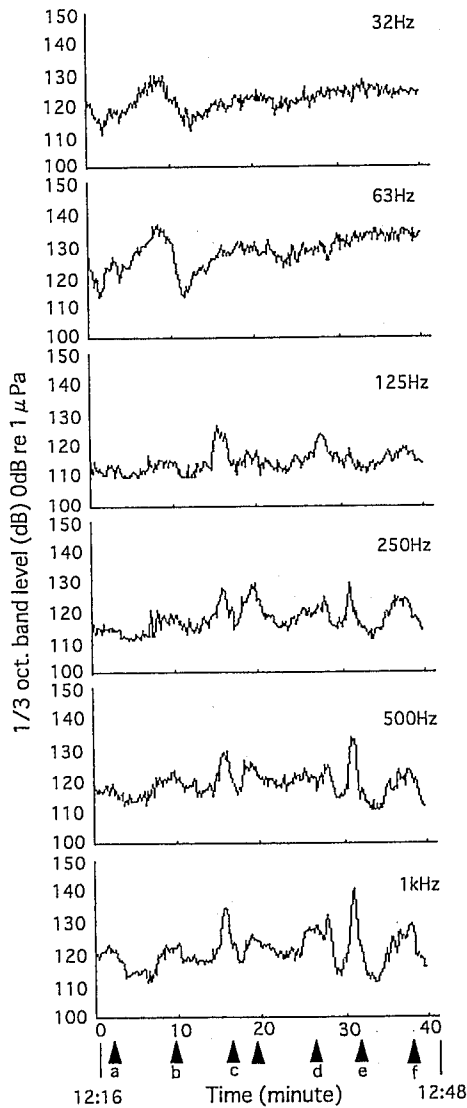


Fig. 3. Temporal variation of the 1/3 octave band level in 0 dB re $1 \mu\text{Pa}$ at St. A.

The closed triangle shows the CPA of cruising vessel and frequency shows the center frequency of 1/3 octave band at intervals of one octave band (32~1000Hz).

る。また出入港時のなだらかなピークには、スペクトログラム (Fig. 2, C) 上に干渉模様を見ることができ、急峻なピークは持続時間が約2分間と短く、距離変化も小さいため干渉は生じているものの模様としてその変化を読み取ることはできない。

鳴池港南方0.5マイル沖Dの深さ5mおよび24mにお

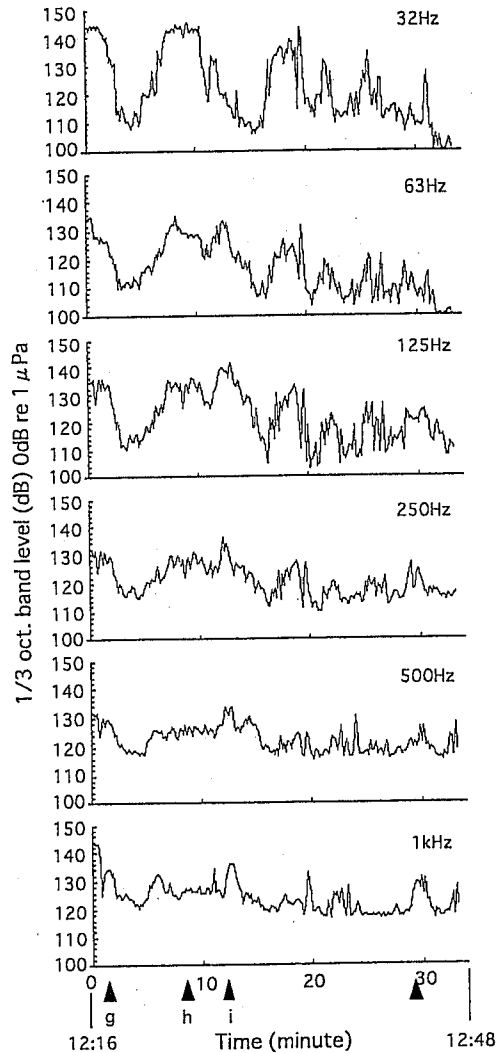


Fig. 4. Temporal variation of the 1/3 octave band level in 0 dB re $1 \mu\text{Pa}$ at St. B.

Legends as in Fig. 3.

ける中心周波数 32Hz, 125Hz, 1kHz の1/3オクターブバンドレベルの時間変化を Fig. 6 に示す。DではC同様、両深さで32Hzのバンドレベルは船舶の航走に関係なく一定であり、静寂時 (D-1; 13時07分~11分, D-2; 14時19分~22分) の125Hz, 1kHzのバンドレベルは、深さ5mで108dB, 112dB, 深さ24mで110dB, 116dBを示し、表層 (5m) より底層 (24m) で若干高い。またスペクトログラム (Fig. 2, D) 上では表層よりも底層において干渉による縞模様が細くなること

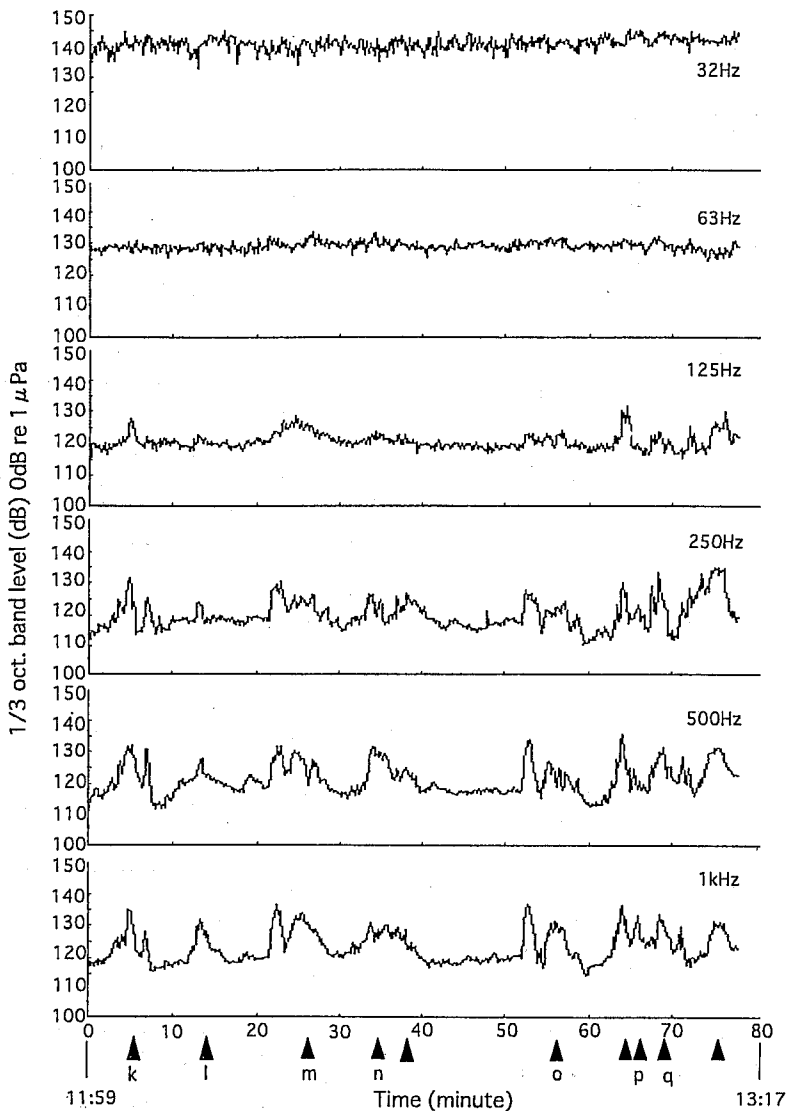


Fig. 5. Temporal variation of the 1/3 octave band level in 0 dB re 1 μ Pa at St.C. Legends as in Fig. 3.

が認められる。ただしここではCで見られた出入港時の二山型を示すバンドレベル変化は見られない。

沖小島西沖Eおよび沖小島南沖Fの表層(10m)では、スペクトログラム(Fig.2, E-1, F-1)上に干渉模様が認められる。しかし海底が海盆への急斜面となる海域の中層(100m; E-2)および反射面となる海面・海底までの距離が大きくなる水深が183mと深い海域の中層(100m; F-2)では、干渉模様を確認することは難しい。また垂水フェリーの離合部となる沖小島南沖Fでは、スペクトログラム(Fig.2)上に航走雑音

のピークが連続して現われるが、谷山港沖G深さ10mのスペクトログラム(Fig.2, G)上には見られるような出港船rと低速で入港するsの干渉模様の重なりは認められない。一方E, Gでは静寂時(E-1; 11時12分~19分, E-2; 11時49分~52分, G; 14時02分~12分)の32Hzのバンドレベルの平均値は100dB, 63Hz以上では106~120dBを示し、他の海域のような低周波のバンドレベルが高い特徴は見られない。これはフェリーのみ航路で港から十分離れているため(E), また本港区に比べ船舶の出入港の頻度が少なく、主要

鹿児島港周辺海域の水中音環境

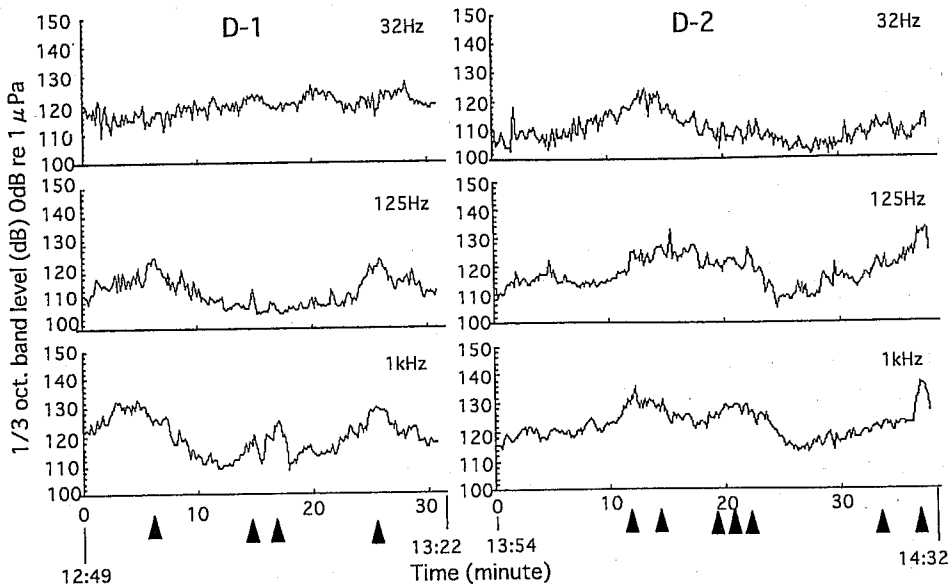


Fig. 6. Temporal variation of the 1/3 octave band level in 0 dB re 1 μ Pa at St. D-1 and -2. Legends as in Fig. 3.

航路から2マイル以上離れているため (G) で鹿児島港内にあっても比較的船舶航走雑音の影響が低い海域といえる。

このように港湾域の水中音環境は、大型船舶の主要航路からの距離によって騒静の差があり、船舶からの海中放射雑音の時間変化も水深や受波器深さおよび船速などの条件によってさまざまな変化を見ることがわかった。

4. 考察

藤枝ほか (1996) は鹿児島湾奥部海域のような静寂な海域では、海底に近いほど生物雑音が大きく、船舶の航走雑音が急激な音圧変化を生むと報告している。また船舶航走雑音の影響の無い沿岸部における水中音環境の日周変化については、海洋生物による自然雑音が日出後、日没後それぞれにピークを持ち、陸上からの人工雑音が日中に高くなるとしている。当海域においても静寂時のバンドレベルは、鴨池港南Dで見ると限り表層 (5m) より底層 (24m) の方が若干高い。しかし船舶交通が激しい当海域の水中音環境の日周変化は、生物等による自然雑音の影響よりもむしろ船舶交通による人工雑音に強く影響され、船舶交通量、地形その他の条件によって特有の水中音環境が形成されると考えられる。以下港内周辺海域の水中音環境の成因と特

徴について考察する。

まず鴨池港沖Cではフェリー航路近傍でかつフェリー岸壁が港外に開いているため、出入港時の操船作業が海中雑音に大きな影響を与えている。航行状態の目視観測より判断すると、出港時の二山型の音圧変化は後進離岸に続く前進回頭に起因する機関操作によると考えられる。特に出港時に見られる瞬時に 500Hz, 1kHz のバンドレベルが 17dB も増加する強い急峻なピークは、離岸時の後進発令によって生じるプロペラ雑音の影響である。一方入港時では干渉模様を持つ航走雑音が一時消え、その後 250Hz 以上に小さなピークを持つ雑音が続く。このピークは行足を止めるための後進、もしくはスラスターの使用によるものと考えられるが、漸増してきた航走雑音に続いて発生するためにバンドレベルの変化は出港時よりも小さい。しかしCと同じく港出入口の防波堤から0.3マイルの距離である鹿児島本港沖Aでは、着岸岸壁が防波堤からさらに0.5マイル奥にあるため、機関操作による海中雑音の音圧変化は認められない。よって二山型となる出入港時の海中放射雑音は、港外に開けた港周辺特有の水中音環境であるといえる。またここで見られた音圧の急激な上昇は、その他に船速の速いジェットホイルや小型漁船、プレジャーボートによっても生じ、それらのスペクトルパターンは鄭ほか (1995) と同じく一般船舶の航走

雑音に比べ高周波の1kHzでバンドレベルが3~7dB高い傾向を持つ。

また当海域では、大型船舶が桜島水道の漁場直上を通航し、海づり公園のすぐ近くを小型船舶やフェリーが頻繁に通航するため、音圧の大幅な上昇が頻繁に生じる。魚は140~160dBの音圧レベルで逃避行動を生じるという報告(石岡ほか, 1985)があることから、140dB以上の最大音圧の発生は、前述した急激な音圧変化の存在とともに港湾域における重要な水中音環境の特徴と言える。

さらに平坦な海底を持つ浅海では、海面と海底間を音波が繰り返し反射しながらある距離を伝搬する浅海サウンドチャンネル(JENSEN, 1981)と呼ばれる特有な現象が生じる。大木・早坂(1983)によると当海域の底質は砂質で海底反射係数が高い(LIEBERMANN, 1948)ことから、海底付近では海底反射波による干渉の影響も十分考えられる。船舶航走雑音に干渉効果が生じる場合、Fig. 2に示すようにスペクトログラム上に縞模様となって現われる。浅海における航走雑音の干渉理論(藤枝ほか, 1998)によると、干渉模様の複雑さは、伝搬経路の数によって決まり、それには水深と伝搬距離が関係する。またその縞模様の間隔は水深に、縞模様の変化は船速に依存する。よってジェットホイルやモーターボート等の高速船による航走雑音は、距離変化が大きいため位相変化が激しく、解析間隔をさらに短くしなければ干渉の変化を模様として読み取ることは難しい。しかし一般船舶が接近してくる場合、干渉によってスペクトログラム(Fig. 2)上では、上昇してきた800Hz以上の広帯域のスペクトルレベルが一時減少し、最接近の直前で急増する現象(B-2j)や、600Hz以下で各スペクトルレベルが接近に伴って増減しながら上昇する現象(G-r)が見られる。また複数の船舶が航走する場合、浅海域であれば干渉模様が重なり合う(G)。

なおA, C, D点において65Hz以下の周波数が船舶航走の有無に関係無く一定であったことは、松野ほか(1996)より0.5ノット以上の潮流の影響を受けていたためと推察する。

以上をまとめると船舶航走の激しい港湾域の水中音環境では、1) 港湾域の水中音環境の日周変化は、生物等による自然雑音の影響よりも船舶交通による人工雑音の諸条件に強く影響される。2) 岸壁が港外に開

いている場合、出入港時の操船作業が海中雑音に大きな影響を与える。3) 高速船の航走雑音のスペクトルレベルは一般船舶の航走雑音に比べ高周波で高い傾向を持つ。4) 船舶の航走によって140dB以上の最大音圧が発生する場合がある。5) 浅海域では干渉現象が頻繁に生じている。6) 浅海域において船舶が複数航行する場合、干渉模様が重なり合う。7) 深海域や海底が急斜となる海域の中層では干渉効果は生じにくい。8) 潮流のある海域では65Hz以下の低周波のバンドレベルが高くなる。今後、魚のさまざまな音に対する行動を解明するには、以上のような複雑な浅海域の水中音環境に留意する必要がある。

謝 辞

本実験に際し多大な御協力をいただいた南星丸の船長柿本 亮氏および乗組員に感謝いたします。また鹿児島大学水産学部漁船航海学講座のF.E. KAPARANG氏をはじめとする学生諸君の労を多とする。ここに御礼申し上げます。

引用文献

- BACHMAN, R.B. and G.T. KAYE, (1983) Broadband interference patterns in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, **74**, 576-580.
- 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. *日本水産学会誌*, **61**, 553-560.
- 藤枝 繁・稲元忠弘・山中有一・松野保久(1998) 航行中の船舶から海中へ放射される雑音の干渉効果. *日本水産学会誌*, **64**, (印刷中).
- 藤枝 繁・松野保久・山中有一・稲元忠弘・中島大輔(1996) 鹿児島湾奥部海域の水中音環境. *水産海洋研究*, **60**, 54-61.
- 石岡宏子・島山良己・坂口清治(1985) 音刺激が魚類の生理生態におよぼす影響. 本四連絡架橋漁業影響調査報告. *日本水産資源保護協会*, **33**, 49-62.
- JENSEN, F.B. (1981) Sound propagation in shallow water: A detailed description of the acoustic field close to surface and bottom. *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**, 1397-1406.
- LIEBERMANN, L.N. (1948) Reflection of sound from coastal sea bottoms. *J. Acoust. Soc. Am.*, **20**, 305-309.
- 松野保久・藤枝 繁・山中有一・F.E. KAPARANG・有田洋一・栗原哲哉(1996) 鹿児島湾桜島水道養殖場生簀内におけるカンパチの発する水中音. *水産海洋研究*, **60**, 122-129.
- 大木公彦・早坂祥三(1983) 鹿児島湾の底質と地形-特に底質からみた鹿児島湾の海水の動きについて. *沿岸海洋研究ノート*, **21**, 1-10.