

鹿児島湾における水中音環境に関する研究

藤 枝 繁

Study on the Underwater Sound Environment in Kagoshima Bay*¹

Shigeru Fujieda*²

Keywords : Underwater sound, Audiogram, Swimming sound, Fishing boat, Kagoshima Bay

Abstract

The underwater sound environment in shallow water area was complicated by time and depth under the influences of the biological and artificial noises from land and sea, *e.g.*, trains, cars, feeding, cruising boats, *etc.* The purpose of this study is to clarify the underwater noise background and the underwater sound environment weighted by auditory sensation of fish in Kagoshima Bay.

The emitted noise by drifting and cruising vessels has the largest influence on the underwater sound environment in shallow water area. There were recorded the vertical underwater noise by drifting vessel and approaching noise by cruising vessel. The transmission rays of underwater noise by drifting vessel have two directions, *i.e.*, direct and reflected rays; interference occurs while receiving the two direction sound waves with a hydrophone simultaneously. As an interference theory of underwater sound in shallow water was obtained as an equation with the range of transmission rays from drifting and cruising vessels to hydrophone for the reflection number. A comparison between theoretical and actual interference was made with a measurement of the ambient noise and traffic value in the heavy traffic area of Kagoshima Port. It was confirmed that the main noise was emitted by vessels, and the characteristic noise was temporal and sharply increased.

In the biological noise, the underwater sounds measured in net cages at a culture ground were analyzed by the zerocrossing method to obtain the period change, power, and continuation time of swimming sounds by fish. The audiogram of a bastard halibut *Paralichthys olivaceus* was measured by a classical respiratory conditioning technique. The hearing response of bastard halibut was also measured by sweeping sound, and clarified the upper limit frequency of hearing.

The lowest threshold of bastard halibut was at about 100 Hz and the threshold increased rapidly at 200-400 Hz. The ambient noises are mainly broadband and appears under 3 kHz of fine auditory sensation in fish. The hearing ability differs among fishes, thereby the underwater sound environment also differs. Arrangement was made on the frequency-weighted characteristics for auditory sensation of fish, "fish weighting" using these audiograms, in comparison with the underwater sound environment and underwater noise level of each fish.

The fish weighting of bastard halibut is a type of low frequency with narrow band; the underwater noise level is strongly affected by emphasis on the interference level of low frequency. The fish weighting of a Japanese horse mackerel *Trachurus japonicus* is a type of high frequency with wide band; the underwater sound environment is influenced by the interference with wide band, but a small effect on variation of the underwater noise level.

*¹ 鹿児島大学審査学位論文 (Thesis submitted for the doctoral degree in fisheries science at Kagoshima University September, 1998)

*² 鹿児島大学水産学部環境情報科学講座 (Laboratory of Environmental and Information Sciences, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890-0056 Japan)

目次

第1章 緒言	4) 最接近距離
1.1 本研究の目的	4.5 考察
1.2 水中音環境研究史	第5章 魚群遊泳音
1.3 浅海域における周囲雑音	5.1 収録方法
第2章 鹿児島湾における周囲雑音	5.2 解析方法
2.1 測定海域	5.2.1 魚群遊泳音波形の抽出
2.2 測定および解析方法	5.2.2 ゼロクロッシング法による 魚群遊泳音波形の周期解析
2.2.1 周囲雑音	5.3 結果
2.2.2 海上交通量調査および船舶航跡調査	5.3.1 生簀内水中音の特徴
2.3 結果	5.3.2 魚群遊泳音の特徴
2.3.1 鹿児島湾奥部海域	5.3.3 ゼロクロッシング法による 魚群遊泳音の解析結果
1) 周囲雑音の鉛直特性	1) 魚種別遊泳音周期頻度分布
2) 周囲雑音の日周変化	2) 遊泳音周期- P_{max} 頻度スペクトル
2.3.2 鹿児島港周辺海域	3) 魚種別遊泳音持続時間
1) 海上交通特性	5.4 考察
2) 周囲雑音の水域別特徴	第6章 魚類の聴覚特性
2.4 考察	6.1 供試魚
2.4.1 沿岸域の周囲雑音の特徴	6.2 測定装置
2.4.2 港湾域の周囲雑音の成因と特徴	6.2.1 音響実験用遮音室
第3章 停泊船舶から放射される海中雑音	6.2.2 条件刺激発生装置
3.1 供試船および測定海域	6.3 測定方法
3.2 測定および解析方法	6.3.1 条件付け
3.3 干渉理論	6.3.2 条件反応測定法
3.3.1 干渉理論	1) 心電図
3.3.2 干渉周期	2) フィルムセンサ
3.3.3 干渉現象の解析限界	6.4 結果
3.3.4 干渉模様シミュレーション	6.4.1 遮音室による実験水槽内の遮音効果
3.4 結果	6.4.2 フィルムセンサを用いた 条件反応測定法の実用性の検討
3.4.1 停泊船舶から放射される海中雑音の特徴	1) 検出波形
3.4.2 海中放射雑音の鉛直特性	2) 条件反応
3.4.3 干渉模様の抽出	6.4.3 オーディオグラム
3.5 考察	1) ティラピア
第4章 航走船舶から放射される海中雑音	2) ヒラメ
4.1 供試船および測定海域	3) マアジ
4.2 測定および解析方法	6.4.4 スイープ音に対するヒラメの反応
4.3 干渉理論	6.5 考察
4.3.1 浅海における水中音伝搬の特性	1) 魚類のオーディオグラム
4.3.2 干渉理論	2) 魚類の聴感補正曲線
4.3.3 干渉特性	第7章 総合考察
4.3.4 干渉模様シミュレーション	7.1 鹿児島湾の水中音環境
4.4 結果	7.2 魚類の聴覚特性から見た水中音環境
4.4.1 航走船舶から放射される海中雑音の特徴	
4.4.2 海中放射雑音に及ぼす諸条件の影響	
1) 水深	結論
2) ハイドロホン深さ	謝辞
3) 船速	文献

第1章 緒 言

1.1 本研究の目的

ハイドロホンを用いて浅海沿岸域の海中音を収録した場合、船舶や生物および陸上騒音などに起因する広帯域の持続音やパルス音を頻繁に聞くことができる。その中でもハイドロホン自体やその装着方法によって生じる自己雑音を除いた海中の雑音を周囲雑音 (ambient noise) と言う。これまで浅海沿岸域で収録されてきた種々の周囲雑音の主たる周波数成分は、魚類の可聴域にはほぼ一致する 1kHz 以下に特徴が見られた。¹⁻¹⁰⁾ この周囲雑音の雑音源は、生物雑音や海況雑音のように広域に分布するものあれば、船舶放射雑音のように高速で移動するものもある。また音源の日周活動によって時間的にも変化する。さらに船舶放射雑音のような高出力雑音は、海底と海面の2つの境界面にトラップされて伝搬してくるため、直接波と多重反射波が干渉し、音源との距離により空間的に異なった音場が形成される。したがってこのような浅海沿岸域の周囲雑音の特徴を一度に捕えることは難しい。これまで周囲雑音に関する研究では、ある深さで、特定時刻に短時間収録する方法が主であった。この方法では、周囲雑音の空間的特徴を得ることはもちろんのこと、雑音背景の時間変動が解明されていなければ、目的とする音を得ることもできない。また時間的・空間的特徴が解明されていない過去の研究結果を比較することもできない。本研究では、半閉鎖的内湾である鹿児島湾をモデル海域として雑音背景を限定した条件で鉛直方向また長時間の収録を行い、浅海沿岸域の周囲雑音を時間変動や音響特性に海域の音響構造を含めた水中音環境として捕らえ、その特徴を得ることを目的とした。

さらに浅海沿岸域のように非常に多様な雑音背景を持つ水中音環境下で生息している魚類は、行動や生理にその影響を受ける。これまで多くの研究者により雑音背景の音響特性と魚類の聴覚特性の関係について考察されてきたが、¹⁻¹³⁾ 実際、魚が周囲雑音をどのような音として聴いているか報告された例はない。魚類の水中音環境とは、その受波能力内で受波した自らの遊泳音や発生音を含む周囲雑音と、海域特有の伝搬条件によって構成される音響環境を示す。ただし実際は、魚種により聴覚特性が異なるため、同じ強さの音であっても魚種によって聞こえる音の大きさや音色が異なると推察される。よって本論文では、浅海沿岸域における魚類の生息環境要因の一つとして水中の音環境に注目し、魚類のオーディオグラムから求めた聴感補正曲線を用いて魚を取り巻く周囲雑音、船舶放射雑音、魚群遊泳音を補正し、受波者であ

る魚がどのような水中音環境下で生活しているかを探ることを試みた。

本論文の構成は、まず第1章で魚類の水中音環境の定義、浅海域の周囲雑音に関する研究史およびその周囲雑音の特徴について述べ、第2章では、浅海沿岸域の水中音響環境の時間的・空間的特徴を把握するために、半閉鎖的内湾である鹿児島湾奥部海域の周囲雑音を測定し、その鉛直特性や地域的特性、また沿岸部での生物雑音と陸上からの人工雑音の時間変化について考察した。また鹿児島湾周辺海域の周囲雑音と海上交通の実態を測定し、船舶航走雑音の影響が強い港湾域の水中音環境の特徴についても考察した。その中でも特に高出力広帯域の船舶放射雑音は、海面と海底に音波がトラップされる浅海サウンドチャンネルによって生じる干渉現象のため、空間的に特殊な水中音環境を形成する原因となる。そこで第3章では、停泊船舶から放射される海中雑音を水深の異なる海域で測定し、直接波と海底反射波による干渉の理論値と比較して浅海における音源直下の水中音の空間的特徴について考察した。また第4章では、航走船舶から放射される海中雑音について種々の条件で測定し、浅海サウンドチャンネル内における音線理論から求めた理論値と比較して浅海域における移動音源に対する水中音の空間的特徴について考察した。また第5章では、マダイ *Pagrus major*、ブリ *Seriola quinqueradiata*、ヒラマサ *Seriola lalandi*、カンパチ *Seriola dumerili*、およびトラフグ *Takifugu rubripes* の養殖生簀内で収録した水中音から、ゼロクロッシング法を用いて魚群遊泳音波形の周期を求め、受波者自ら発する遊泳音の特徴について考察した。さらに第6章では、これらの周囲雑音や海中放射雑音の受波者である魚の聴覚特性を得るため、従来の心電図を用いる方法に加え、呼吸周期の変化として現われる条件反応を非挿入型フィルムセンサを用いて測定する方法を試み、ティラピア *Tilapia niloticus*、ヒラメ *Paralichthys olivaceus*、およびマアジ *Trachurus japonicus* の3魚種のオーディオグラムを求めた。また浅海域には、船舶航走雑音のように干渉によって周波数が緩やかに変化する持続音が存在する。特に可聴範囲の狭いヒラメでは、非可聴域と可聴域の境界が明瞭に現れると考え、非可聴周波数から可聴周波数へピーク周波数がスweepする持続音に対する知覚反応を測定した。また得られたオーディオグラムから各魚種の聴感補正曲線を製作し、第7章では、第2～5章で測定した浅海域における種々の周囲雑音を魚の聴感補正曲線を用いて補正して魚がどのような周囲雑音を聞いているかを探り、魚類の水中音環境について総合的に考察した。また同時に浅海

域の水中音環境に関する今後の研究の課題と、本研究で用いた種々の解析方法の今後の応用について述べ、最終の第8章では、本研究の成果をまとめた。

1.2 水中音環境研究史

我が国における水産動物と水中音響に関する研究は、1934年の内田による“本邦産発音魚類について”¹⁴⁾が最初で、海中生物の発する騒音について魚類の可聴周波数範囲で実験が行われた。しかし当時のハイドロホンは、周波数特性が良好でなかったために十分な結果は得られなかった。1950年代に入り、橋本らは50Hz~35kHzで平坦な周波数特性を持つハイドロホンを自作し、東京湾南部の久里浜沖¹⁵⁾や神奈川県小田原沿岸¹⁶⁾の周囲雑音、および海中生物の発する音の測定¹⁷⁾を始めた。1960年代になると、魚種判別や漁獲予知の手段として魚群遊泳音を利用する試みが行われ、¹⁸⁻²⁰⁾また魚の音響に対する誘致威嚇に関する研究も始まった。²¹⁻²⁴⁾日本海イカ釣漁業において水中音に集魚効果があること^{25, 26)}が報告されたのを契機に、魚に対して積極的に水中音を利用しようとする研究が始まり、威嚇や集魚に有効な音を求めてさまざまな海中生物音の測定が行われた。^{27, 28)}1960年代の後半から、漁船や漁具の海中放射雑音が測定され、漁獲効率や魚の行動に与える影響^{4, 11, 29-34)}や、漁具が発する音による魚の誘引^{35, 36)}・威嚇³⁷⁻³⁹⁾について論じられるようになった。また高度経済成長期の1970年頃になると、海岸附近の飛行場の航空機騒音、道路工事や埋立工事で発せられる騒音および発破音によって各地の沿岸漁業に被害が頻発し、水中音と魚群生態との関連研究の必要性が叫ばれるようになった。そこで瀬戸大橋を代表とする大型海洋土木事業では、音と逃避に関する多くの研究が行われた。⁴⁰⁻⁴⁸⁾このような音響に対する魚の行動に関する研究を基礎として、1977年には熊本県水保湾において音響による魚群の大規模制御駆集効果の研究⁴⁹⁾が開始された。この研究は、その後各地で行われる海洋牧場の実用化試験⁵⁰⁻⁶⁰⁾の基礎となり、現在では音響に対する魚類の聴覚生理^{61, 62)}や行動⁵³⁻⁷⁰⁾に関する基礎研究が盛んに行われるようになった。

魚類の聴覚能力に関する研究は、1918年にParker⁷¹⁾が魚類の聴覚能力について発表して以来、今日までに海外では49魚種以上のオーディオグラムが求められた。⁷²⁾日本でも、この10年間でマダイ、^{47, 48, 61, 62)}ニジマス *Salmo gairdneri*,^{73, 74)} サクラマス *Oncorhynchus masou*,⁷⁵⁾ クロソイ *Sebastes schlegeli*,^{76, 77)} スケトウダラ *Theragra chalcogramma*,^{13, 76)} マコガレイ *Pleuronectes yokoha-mae*,⁷⁹⁾ ティラピア,^{80, 81)} マアジ,⁸²⁾ およ

びヒラメ^{81, 83, 84)}などの重要水産魚種のオーディオグラムが求められた。最近では、これらの結果を基礎として魚群誘致のための有効な音刺激を求めて種々の研究が進められている。⁸⁵⁻⁸⁹⁾

しかしこれら周囲雑音と魚類の聴覚能力に関する研究は、各分野で別々に進められてきたため、両者を総合した研究は少ない。⁹⁰⁾その理由は、周囲雑音が様々な雑音を含むため、特定の音源の特徴を掴むことが難しく、またそれができても音源に地域的共通性がないため、すべての海域で適用できなかったためである。また収録・解析方法に上記の特徴への配慮がなかったことから、聴覚特性と総合した考察を行うには資料が不十分であったためでもある。そこで筆者らは、魚類の聴覚特性の研究⁸⁰⁻⁸⁴⁾と同時に、周囲雑音を魚類の生息に関わる一環境要因として捉え、1993年より鹿児島湾において、養殖生簀内の魚群の摂餌音や遊泳音、^{1-3, 5, 10)}湾奥海域の周囲雑音、⁶⁾および船舶からの海中放射雑音^{4, 7-9)}などの研究を行ってきた。ここでは、時間的空間的に複雑な浅海沿岸域の周囲雑音を、浅海域特有の音波の伝搬特性を含む水中音環境として捉えることにより、特定の雑音源の音響特性や伝搬特性および周囲雑音の地域的特徴に関する知見を得た。

1.3 浅海域における周囲雑音

大陸棚や外洋に面した沿岸域における外洋性周囲雑音は、風による海況雑音が主であるため、風速変化によって雑音レベルが変動する。⁹¹⁻⁹³⁾浅海域においても3kHz以下のスペクトルレベルは、風速と相関が良いとされるが、⁹²⁾沿岸域や港湾域における周囲雑音は、その海域特有の雑音背景の影響を強く受けるため、沖合いに比べ数dB高い。¹⁶⁾浅海沿岸域における雑音背景は、海域によって影響の度合は異なるが、自然雑音、生物雑音、人工雑音に大別される。

まず自然雑音とは、波の破碎、⁹⁴⁾砂礫の摩擦、波浪、^{19, 94)}降雨、^{16, 95-99)}海底地震、火山爆発、海底噴気、⁶⁾落盤などの自然の物理的現象に基づいて発生する音で、これには水分子の擾乱に基づく雑音も含まれる。自然雑音の中でも風浪による海況雑音は、船舶放射雑音がない海域では生物雑音と共に周囲雑音の主因となる。沿岸域の10Hz~3kHzの雑音レベルは、Piggot⁹²⁾によると風速に依存し、風速が2倍になると7.2dB増加する。また台風接近時の周囲雑音は、安藤・竹村⁹⁴⁾によると有義波高が1mになる以前から12.5Hz以下の周波数帯が増加し、有義波高1mを越えるあたりから32Hz~400Hzの周波数帯のスペクトルレベルが上下変動し(碎波音)、

さらに有義波高2mを越えるあたりで初めて16Hz~25Hz, 500Hz以上の周波数帯が顕著に増加するとしている(港内波浪音)。一方, 雨による海中音は, Scrimger *et al.*³⁰⁾によると13.5Hzに最大値を持ち, 雨粒が大きくなるほど低周波域が増大する。また降雨時の音圧レベルは, 橋本¹⁶⁾によると晴天時に比べが5~8dB高い。アラレによる海中音は, 2kHz~5kHzの間に最大値を持ち, 雪では周波数に対し平均5dB/octaveで上昇する周波数特性を持つ。³⁰⁾ その他にも特に火山性海湾である鹿児島湾奥部海域東部には“たぎり”と呼ばれる海底噴気孔群からの噴気が見られるため, その付近では, 気泡の上昇により特殊な水中音環境が形成されていると推察する。

次に生物雑音とは, 水中生物が発する音で, 体の内部もしくは外部器官によって発せられる biological sound (摩擦音, 呼吸音, 鰓と筋肉の相互作用による音)と, 行動に付随して発せられる mechanical noise (捕食音, 遊泳音, 警戒音, 生殖音, 呼吸音)に区別される。¹⁰⁰⁾ 例えば biological sound を発する魚は, ニベ *Nibea mitsukurii*, ホウボウ *Chelidonichthys spinosus*,¹⁰¹⁾ haddock *Melanogrammus aeglefinus*,¹⁰²⁾ Atlantic cod *Gadus morhua*,²⁷⁾ コイチ *Nibea albiflora*, シログチ *Argyrosomus argentatus*,¹⁰³⁾ カサゴ *Sebastes marmoratus*¹⁰⁴⁾, スケトウダラ^{105, 106)} などが知られている。一方魚群を形成する魚種では, 個々の魚から発せられる遊泳音が支配的となる。これまで魚群遊泳音は, ジャンプ時や尾で水面をたたく時に発生する低周波の持続時間の短い音であるとされてきたが,^{107, 108)} 竹村¹⁰⁹⁾ は, 浮魚魚群が発する音は, 魚の遊泳行動に伴って発する遊泳付随音がほとんどで, その卓越周波数は1kHz以下であり, その周波数組成は群を構成する個体数の増減には影響されないが, 個体数の増加によりスペクトルレベルが一様に増加すると述べている。また捕食音は, サバ *Scomber japonicus*, カラフトマス *Oncorhynchus gorboscha* では, 200Hzと2~3kHzがピークで, 600Hz~1kHzに凹帯を持ち,²⁸⁾ マダイでは, 160Hz~1kHzと2.5kHz~6.3kHzで卓越し, 800Hzおよび2.5kHz付近に極大値を持ち,³⁾ カンパチでは, 200Hz以下と800Hz~3.15kHzで卓越し, 1kHz付近に極大値が存在した。³⁾ しかし同じ魚種でも, 測定した養殖場によってその特徴は若干異なった。^{3, 5, 10)} 一方, 魚類以外の生物雑音について橋本・間庭¹⁷⁾ は, 沿岸域の特に岩礁地帯では, 岩に附着しているフジツボやヤドカリなどの生物が主雑音源であるとしている。また貝類は呼吸や砂上を移動する時に,¹⁷⁾ ズワイガニ *Chionoecetes opilio* は摂餌時にかなり高いレベルの水中音を発生し, ハコエビ *Linuparus trigonus*¹¹⁰⁾ や

イセエビ *Panulirus japonicus*²⁵⁾ は mechanical noise を発することが知られている。また浅海域で最も良く聴くことができるパチパチという音は, テッポウエビ類の打撃音でテンプラノイズと呼ばれている。¹¹¹⁻¹¹⁶⁾ 沿岸域におけるこのテンプラノイズの日周変動は, 夏季では正午頃, 冬季では薄明時に発音活動が活発化し,¹¹⁷⁾ 砂泥質で最も大きく, 日没時に1kHz~4kHzのスペクトルレベルが強まった。¹¹⁵⁾

さらに人工雑音とは, 海中で人工的に発生される音で, その音源は船舶の推進器や機関,^{1-4, 118-119)} 船体の振動, 漁具の衝撃・摩擦,^{30, 33)} 海中人工爆発,⁴⁶⁾ 水中工事,¹²⁾ その他港湾施設や列車や車などの陸上音¹²⁰⁾ などである。その中でも船舶から海中放射雑音は, 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, 船舶の航走が頻繁な沿岸域における主な周囲雑音源となる。^{6, 9, 16)} Urick¹²¹⁾ は前者を機械雑音, 後者をプロペラ雑音の特徴であるとし, 鄭⁴⁾ は, その他にも航走時の海中放射雑音について海面が静穏な場合, 伝搬距離の変化による音圧変化以外にも, 線スペクトル成分のドップラー現象や伝搬経路の異なる音波の干渉による音色の変化が生じると報告している。その他にも沿岸域では, 列車が鉄橋を通過する場合, 列車自体の騒音のみならず鉄橋の振動が橋脚を伝わり川底を振動させて水中に再放射されるため, 自動車走行雑音よりも大きな人工雑音が生じるとされている。¹²⁰⁾

しかし浅海域の水中音環境は, 雑音背景の音響特性以外にも浅海サウンドチャンネル内を音波が伝搬して行くため, 空間的に異なる。この浅海サウンドチャンネルとは, 浅海域において海面と海底の境界面に音波がトラップされて伝搬する現象を言う。海中における音波の伝搬は, 音速の深さ方向に対する分布 (音速プロファイル) および変化率によって大きく影響を受けるため, 遠距離まで音波が伝搬する現象 (ダクト) や近距離にも関わらず音波が到達しない現象 (シャドーズーン) が生じる。さらに浅海域では, 海面や海底の伝搬条件の影響を強く受けるため, 強い干渉現象が生じる。Ide *et al.*,¹²²⁾ Roe,¹²³⁾ および Pekeris¹²⁴⁾ は, 浅海域における海面・海底反射波と直接波の干渉現象に最初に言及した。Pekeris¹²⁴⁾ は, 浅海中の爆発音源から得られる信号パルスが時間的に拡大されることから, これを干渉によるものと指摘した。Pedersen¹²⁵⁾ は, 深海域において航走船舶から530Hzと1030Hzの音波を放射し, 等速水と仮定した音線理論値とその実測値の干渉パターンを比較した結果, 第1シャドーズーンより前方の近距離では両者はよく一致し, そ

れ以遠では屈折の影響で著しく異なることを示した。川上ら¹²⁶⁾は、船舶航走雑音のスペクトログラム上に現れる縞模様を初めて観測し、測定値と3種類の理想的な音道モデルによる計算値とを比較して、伝搬経路の異なる複数の音波が相互に干渉し合うと予想した。この干渉模様は、無指向性受波器で海中放射雑音を受波した場合、直接波と海底・海面反射波が干渉し合うことによって生じ、高周波ほど船舶の移動に伴う両波の位相変化周期が短くなるため、スペクトログラム上に最接近時を中心とした放射状の縞模様として現われる。Jensen¹²⁷⁾は、浅海サウンドチャンネル内において爆発音源から得られる50Hz~3.2kHzの周波数の伝搬を観測し、干渉が生じた実測値とノーマルモード値を比較した結果、30kmまでの範囲で両者は一致するとした。またBachman and Kaye¹²⁸⁾は、水深約42mの海域において船舶航走雑音の実測値と音線理論値を比較し、伝搬経路数が12の時に両者の干渉模様がほぼ一致するとした。また鄭ら⁴⁾は、水深の異なる海域において航走雑音を測定した結果、水深により干渉模様が大きく異なることを示した。浅海域の水中音場を理論的に解析する方法には、音線理論¹²⁹⁾とノーマルモード理論¹³⁰⁾による2種類の近似法がある。しかし両者にはそれぞれ物理的解釈や音線の影、および水深によって変化する音速プロファイルなどの問題があり、特に遠距離伝搬では両者を組み合わせたハイブリッド音線・モード理論¹³¹⁻¹³³⁾が用いられている。

このように浅海沿岸域の周囲雑音は、個々の雑音背景の音響特性だけでなく、主雑音源となる海況雑音や生物雑音および人工雑音の時刻、季節、水域による変化の影響を受ける。さらに遠方から伝搬してくる周囲雑音は、海底地形や海域特有の音速プロファイルなどにしたがって伝搬するため、空間的にもかなり複雑な水中音環境を形成すると推測される。

第2章 鹿児島湾における周囲雑音

鹿児島湾は、南を幅約10海里の湾口部によって太平洋に接する南北約75km、東西約25kmの内湾で、その中でも湾奥部海域は、湾中央部と幅約1海里の桜島水道で接続された半閉鎖的内湾海域である。魚類にとっての水中音響環境を明らかにするためには、まず浅海沿岸域における周囲雑音の特徴を得る必要がある。ただし個々の周囲雑音の特徴を得るには、測定時にできるだけ目的とする音源以外からの雑音の混入を避ける必要がある。そこで本章では、外洋からの海況雑音や船舶放射雑音による影響が比較的小さい半閉鎖的内湾である鹿児島湾奥部

海域をモデル海域とし、その周囲雑音の特徴を求めた。しかしこの広い海域の周囲雑音も、時間的、空間的に変動するため、その特徴を一度に収録することはできない。よって本研究では、周囲雑音や放射雑音の収録を、時間変動、鉛直分布、水平分布のそれぞれに分けて行った。また解析も、従来の特定のハイドロホン深さで収録されたものをスペクトル解析する2次元表示から、鉛直方向または時間軸方向に収録されたものをスペクトル解析し、スペクトログラムという3次元表示を用いて周囲雑音の特徴を得た。

また鹿児島湾北西部の桜島水道西側に位置する鹿児島港は、平均約150隻/日¹³⁴⁾の船舶が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。船舶航走雑音の影響が最も強い港湾域の水中音環境の特徴について、鹿児島港周辺海域をモデル海域としてその海上交通の実態と周囲雑音を測定し、その特徴を得た。

2.1 測定海域

周囲雑音の収録は、1995年5月30日~7月27日、鹿児島湾奥部海域の水深100m以深の桜島水道北部三船沖A、西部大崎ヶ鼻沖B、C、桜島北岸白浜沖D、中央部E、東部福山沖Fの6点にて行った。鹿児島湾奥部海域の海底地形と周囲雑音の収録点をFig.2-1に示す。なお福山沖Fでの収録は、“たぎり”現象を魚群探知機と目視により確認し、その真上に測定船を停船させて行った。なお三船沖A、大崎ヶ鼻沖B、C以外の収録時には、周辺を航行する船舶は視認できなかった。

周囲雑音の日周変化の測定は、1994年7月12日~13日、鹿児島市与次郎ヶ浜水路内Gにおいて行った。この水路は、防波堤で囲まれた幅50m長さ1.8kmの閉鎖水路で、船舶放射雑音や風による雑音の影響がない水域である。

鹿児島港周辺海域における周囲雑音の収録は、Fig.2-2に示す桜島フェリー航路北側の鹿児島本港東方0.3海里沖H、桜島水道中央部の神瀬西方0.3海里沖I、鴨池港北方0.3海里沖J、鴨池港南方0.5海里沖K、垂水フェリーと湾口への船舶の航路交差部となる沖小島西方1海里沖L、垂水フェリーの離合部となる沖小島南方1海里沖Mおよび谷山港東方1海里沖Nの7点で行った。また鹿児島港桜島水道南口附近における船舶通航特性の調査は、同じくFig.2-2に示す鴨池港南0.5海里沖Oにて船舶航跡調査を行い、鹿児島市与次郎ヶ浜の鹿児島大学水産学部鴨池臨海実験所Pから神瀬灯台P'への見通し線(PP'線)上の海上交通量調査を行った。

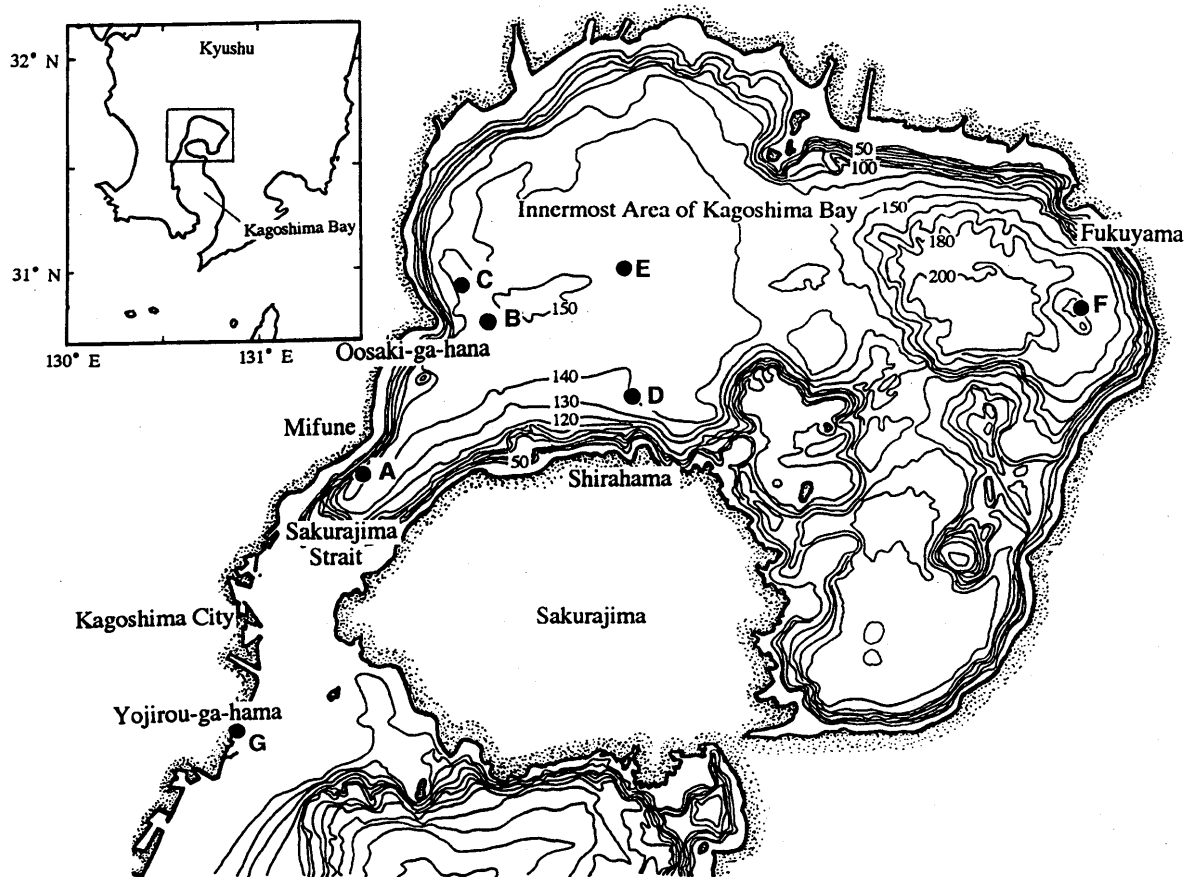


Fig. 2-1 Recording sites and bathymetric map of the innermost area of Kagoshima Bay.

Numbers on the lines show depth in meters. A, off Mifune; B, C, off Oosaki-ga-hana; D, off Shirahama; E, Central; F, off Fukuyama; G, Yojirou-ga-hama.

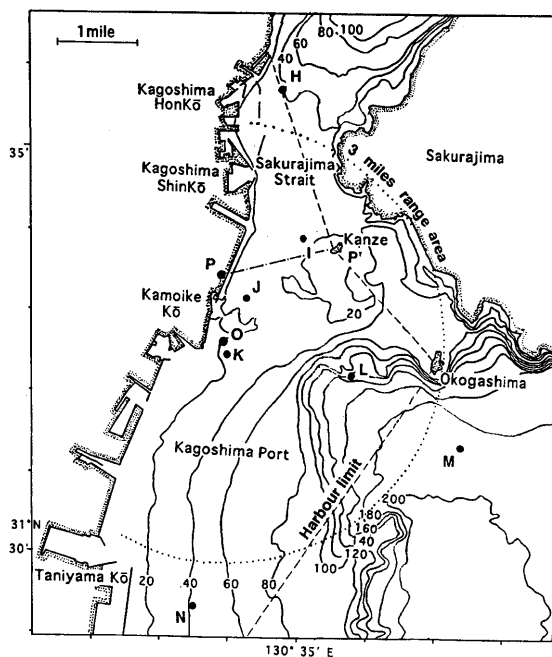


Fig. 2-2 Map of the recording sites of underwater noise (H~N), and the observation sites of marine traffic value (P) and tracks (O) in the Kagoshima Port. Numbers on the lines show depth of water in meters.

2.2 測定および解析方法

2.2.1 周囲雑音

周囲雑音の収録は、Fig.2-3に示すようにハイドロホンST-1005（沖電気工業）を、鹿児島大学水産学部練習船「南星丸」（83トン）の手動海洋観測用ウインチを用いて測定水深まで降下させて行った。なおハイドロホンは、懸垂用ワイヤの振動による低周波雑音の混入防止のため、三角柱型の鉄枠（45×45×80cm、5kg）内に水平方向無指向性となるようにゴムコードで吊り下げた。A~F点での周囲雑音の収録は、ハイドロホン深さ5m、10m、以下10m間隔で100mまでの11点で行い、各点での収録時間は、表層と底層の時間差をできるだけ少なくするために1分間とした。また福山沖Fでの周囲雑音の収録は、ハイドロホンを“たざり”上の深さ100mに懸垂し、23分間連続収録を行った。以上の各測定時の条件をTable 2-1に示す。さらにH~N点での港湾域における周囲雑音の測定は、Table 2-2に示す測定条件で、同じく測定水深にハイドロホンを懸垂して行った。

また周囲雑音の日周変化の測定は、Fig.2-4に示すように幅50mの与次郎ヶ浜長水路Gにロープを渡し、

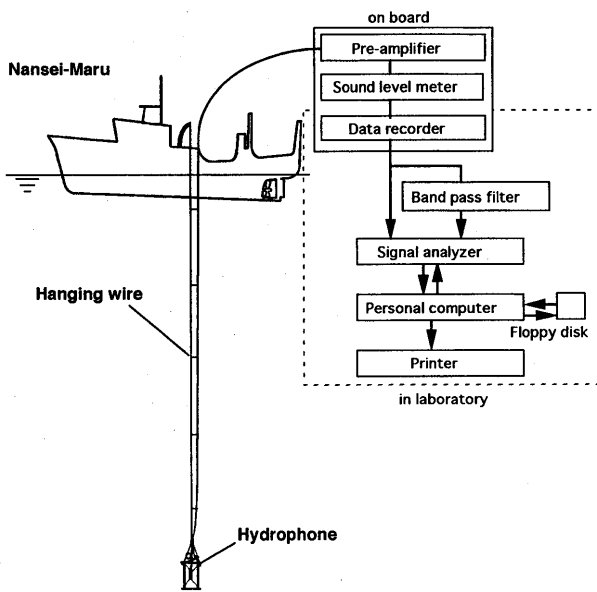


Fig. 2-3 Block diagram of recording instruments of ambient noise.

長水路中央部水深1mの位置にハイドロホンを設置して、日中は1時間間隔、夜中は2時間間隔、および日出前後1時間は30分間隔で3分間の収録を行った。

ハイドロホンで受波した周囲雑音は、船上または陸上のプリアンプST-80A(沖電気工業)を介して水中音圧計SW-1020(沖電気工業)に導き、得られた受波信号をメインアンプで増幅後、データレコーダRD-101T

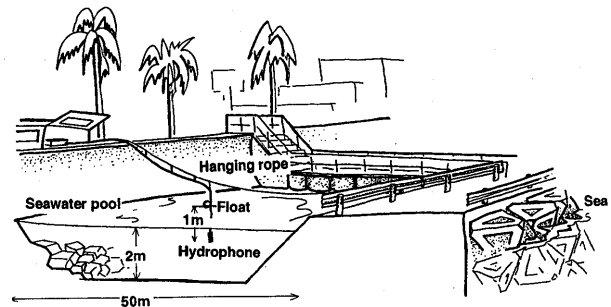


Fig. 2-4 Recording method of the diurnal variation in underwater noise at Yojirou-ga-hama (G).

Table 2-1 The recording conditions of ambient noise in the innermost area of Kagoshima Bay

Recording site	No.	Date	Time (h-m)	Term (min)	Depth (m)	Wind speed (m/s)	Weather ^{*1}
Mifune	A	1995.6.23	10-38~54	16	138	7	b
Ooski-ga-hana	B	1995.5.30	12-24~55	31	145	6	bc
Oosaki-ga-hana	C	1995.5.31	14-27~51	24	137	2.5	c
Shirahama	D	1995.7.7	12-31~50	19	132	6	b
Central	E	1995.7.21	13-10~26	13	145	3	b
Fukuyama	F	1995.5.31	12-25~44	19	149	calm	c
Fukuyama(drift)	F	1995.5.31	12-44~13-07	23	149	calm	c
Yojirou-ga-hama	G	1994.7.12~7.13	10-45~9-45		3	calm	b

*1 b, Blue sky; bc, Fine but cloudy; c, cloudy.

Table 2-2 The recording conditions of ambient noise around the Kagoshima Port

Recording site	No.	Date	Time (JST) (h:m)	Depth (m)	Hydrophone depth (m)	Wind Speed (m/s)	Wind Direction	Weather	Velocify of Tidal Stream (knot)
East of Kagoshima Hon-Ko	H	1996. 8. 2	12:16-12:56	39	5	- ^{*1}	-	bc ^{*2}	-
Center of Sakurajima Strait	1-1	1996.11.19	12:16-12:48	38	10	8	NW	b ^{*3}	0.5
	1-2	1996.11.19	13:12-13:20	38	34	8	NW	b	0.5
North of Kamoike Ko	J	1996.10.15	11:59-13:17	23.4	7	NW	b	-	-
South of Kamoike-Ko	K-1	1997. 4.23	12:49-13:22	22	5	6	N	bc	0.8
	K-2	1995. 5.31	13:54-14:32	22	22.5	6	N	bc	0.8
West of Okoga Shima	L-1	1996.10.29	11:04-11:29	147	10	2	W	c ^{*4}	0.3
	L-2	1996.10.29	11:45-12:05	147	100	2	W	c	0.3
South of Okoga Shima	M-1	1996.11. 7	12:35-12:48	183	10	3	W	b	0.1
	M-2	1996.11. 7	13:01-13:11	836	100	3	W	b	0.1
East of Taniyama Ko	N	1996.10.14	14:02-14:27	43.7	10	W	bc	-	-

-^{*1}: no data.

bc^{*2}: fine but cloudy weather.

b^{*3}: fine weather.

c^{*4}: cloudy weather.

(TEAC) に記録した。音圧は、 $1\mu\text{Pa}$ を基準とした音圧レベルに換算した値で表示した。収録周波数範囲は、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 (24dB/octave)、および 10kHz のローパスフィルタを使用し、 $10\text{Hz}\sim 10\text{kHz}$ とした。なお船上での測定は、測定船からの海中放射雑音を防止するため、測定船の主機ならびに補機を停止し、また交流電源雑音の発生を防止するため、航海計器等のすべての機器を停止させて行った。さらに水中音圧計およびデータレコーダは、交流電源雑音の混入を防止するため、規定の直流電源により作動させた。

収録された周囲雑音は、後日研究室にて信号解析装置 SA-74 (RION) を用いて周波数解析を行い、周囲雑音の鉛直特性、時間変化および日周変化を求めた。まず A~F 点で記録されたハイドロホン深さ 11m ($5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100\text{m}$) の周囲雑音は、各水深 2 回、20 秒間隔で周波数解析し、計 22 個のスペクトルデータを求めた。また F 点の“たぎり”上ハイドロホン深さ 100m で収録された周囲雑音は、1 分間隔で周波数解析し、23 分間計 23 個のスペクトルデータ (F') を求めた。さらに H~N 点で収録された港湾域の周囲雑音は、10 秒間隔で周波数解析を行った。また G 点で収録された 24 時間の周囲雑音は、各測定時刻あたり 1 回の周波数解析を行い、計 27 のスペクトルデータを求めた。なおこれらの解析は、周波数レンジ $\text{DC}\sim 10\text{kHz}$ (帯域幅 25Hz) および $\text{DC}\sim 2\text{kHz}$ (帯域幅 5Hz) でを行い、積算平均処理回数を 10 回とした。

次にこれらのスペクトルデータをパソコンに転送し、 1Hz の帯域幅のスペクトルレベルに換算した後、周波数と水深 (A~F)、周波数と時間 (F', G)、および周波数と距離 (H~N) の関係についてスペクトログラムで表示した。また H~N 点では、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) の時間変化も求めた。

さらに浅海では、主にテッポウエビによって発せられるテンプラノイズまたはフライングノイズと呼ばれるパルス音¹¹¹⁻¹¹⁶⁾の影響によって、 $1\text{kHz}\sim 4\text{kHz}$ のスペクトルレベルが卓越する。^{114, 115, 117)} よって G 点の周囲雑音を、中心周波数 2kHz の $1/3$ オクターブバンドパスフィルタ E-3201B (NF 回路ブロック設計) (24dB/octave) に通し、S/N 比 10dB 以上のパルス音の発生回数を計数してテンプラノイズの日周変化を求めた。

2.2.2 海上交通量調査および船舶航跡調査

井上、原¹³⁵⁾によると、年平均日交通量の推定には

6~7 日の観測日数が適当とし、観測時期は 1 月を除けばどの月でも問題はないとしている。よって海上交通量調査は、平成 9 年 7 月 22 日 10 時~24 日 18 時、27 日 10 時~28 日 10 時、7 月 31 日 18 時~8 月 2 日 10 時の 7 日間、全曜日について PP' 線を横断する全船舶の交通量を観測し、船舶の見通し線通過時刻、針路 (北航、南航) および船種を記録した。なお台風 9 号の接近のため、7 月 24 日 18 時以降一時調査を中断した。船種の分類は、定期船、不定期船 (不定期貨物船、公官庁船など)、港内航行船 (小型油槽船、遊覧船など)、プレジャーボート、漁船とし、夜間、船種の確認ができない船舶は、マスト灯の数により 50m 以上の船舶を不定期船、それ以下を漁船とした。

また桜島水道南部水域を航行する船舶の航跡調査は、O 点に錨泊させた鹿児島大学水産学部練習船「南星丸」(観測船) 搭載の X バンドレーダ JMA-625216 (JRC3) の 3 海里レンジを用いて測定されたレーダ映像を、平成 9 年 7 月 16 日 11 時 30 分から 17 日 11 時 30 分までの 24 時間、 8mm ビデオレコーダ FUJIX-8-M690 (FUJI) に収録した。また同時に最接近時刻、船名または船種を記録した。なお小型漁船とプレジャーボートはレーダで捕捉できなかったため、航跡調査の対象から除外した。航跡の解析は、レーダ映像をパソコン CRT 上に再生し、1 分間隔でレーダ画面中心 (観測船)、神瀬灯台および対象船舶の映像位置を求め、これらを用いて観測船から神瀬灯台への方位および距離を基準とした対象船舶の相対位置を計算し、航跡を得た。

2.3 結果

2.3.1 鹿児島湾奥部海域

1) 周囲雑音の鉛直特性

湾奥部海域の周囲雑音の基本的な特徴を得るために、Fig. 2-5 に A~F 点における 10kHz 以下の周囲雑音の鉛直特性をスペクトログラムで示す。なおこの図は、スペクトルレベルが高いほど薄い濃淡図で示している。これより湾奥部海域の周囲雑音の全体的な特徴は、 1kHz 以下の周波数に最大値が存在し、周波数が増すにつれてスペクトルレベルが低下する傾向を示す。この低周波域の特徴をさらに詳しく見るため、A~F における 2kHz 以下のスペクトログラムを Fig. 2-6 に 3 次元図で示す。

なお一本のハイドロホンを順次降下させて測定したため、Table 2-1 に示すように全水深の測定には 13~31 分の時間を要した。その間、これらのスペクトログラムの一部には沿岸域の周囲雑音の特徴である局所雑音の影響が現れた。例えば、三船沖 A では、深さ 40m を測定

中に列車 (a) が通過し、深さ 60m 以深の測定中では付近の養殖場において給餌作業に従事する漁船 (b) が存在した。列車通過音はスペクトログラム上には現れなかったが、漁船の航走雑音によって 4kHz 以下のスペクトルレベルが約 15dB 増加した。また大崎ヶ鼻 C では、深さ 40m を測定中に通過した巡視艇 (c) によって 10kHz 以上の広帯域のスペクトルレベルが 15dB 以上上昇した。

一方、A~D 点ではテンプラノイズが強く、深さが増すほど高周波域のスペクトルレベルが増加した。これは

海底に近いほど生物雑音の影響が強いことを示している。しかし中央部 E では、テンプラノイズはほとんど聞くことができず、全深さにおいて高周波域に 55dB 以上 60 dB 未満のスペクトルレベルが広く分布し、深さによるスペクトルレベル変化がほとんど見られなかった。

また風が 6m/s と強く、強い周囲雑音の息が聞かれた B, D 点では、200Hz~500Hz のスペクトルレベルが高く、ハイドロホン深さによってスペクトルレベルが激しく変動した。

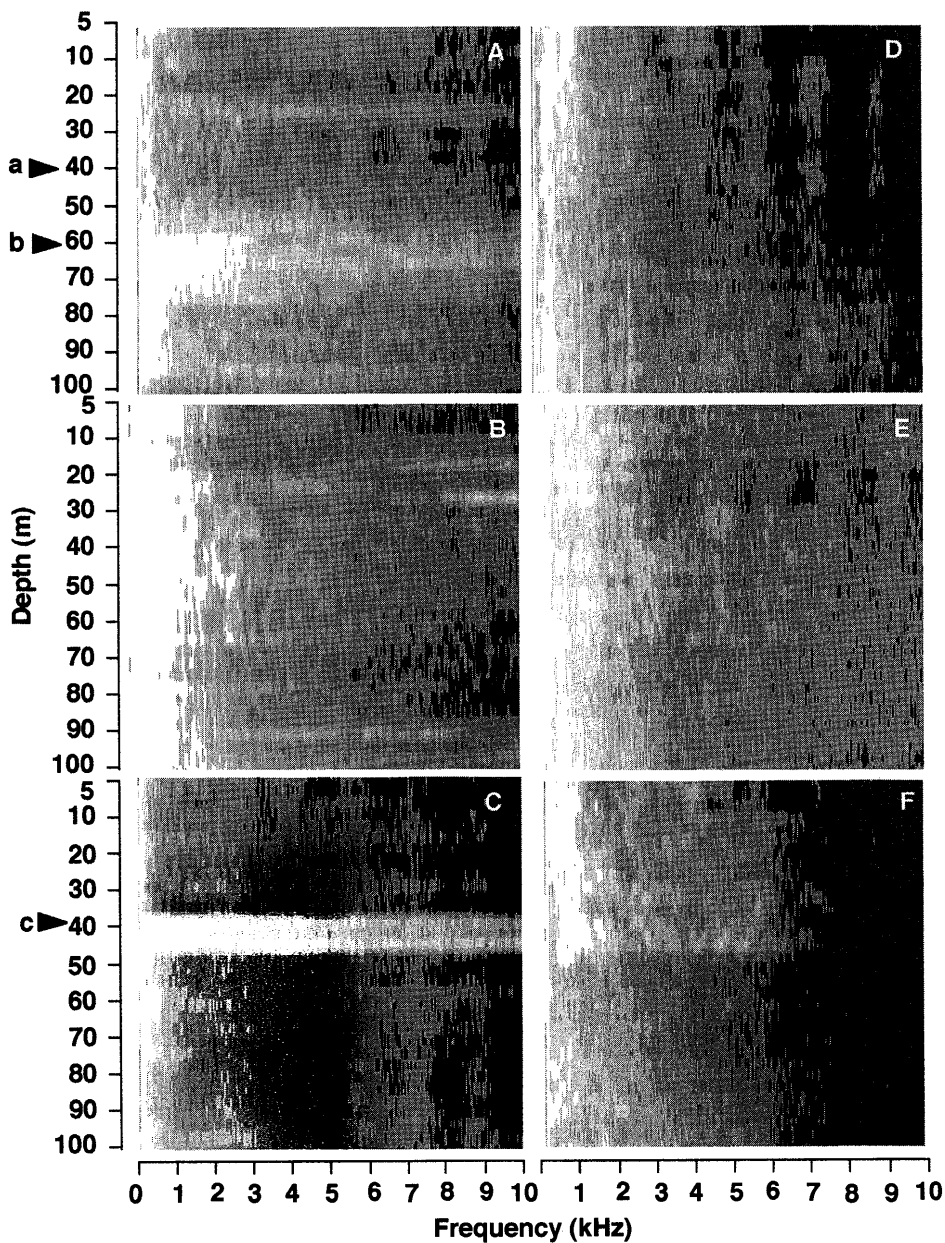


Fig. 2-5 The sound spectrograms (0~10 kHz) of vertical variation in ambient noise by 6 scales.

Scale refers to Fig. 2-7. A~F, recording sites in Fig. 2-1; a, passing train; b, c, cruising small boat.

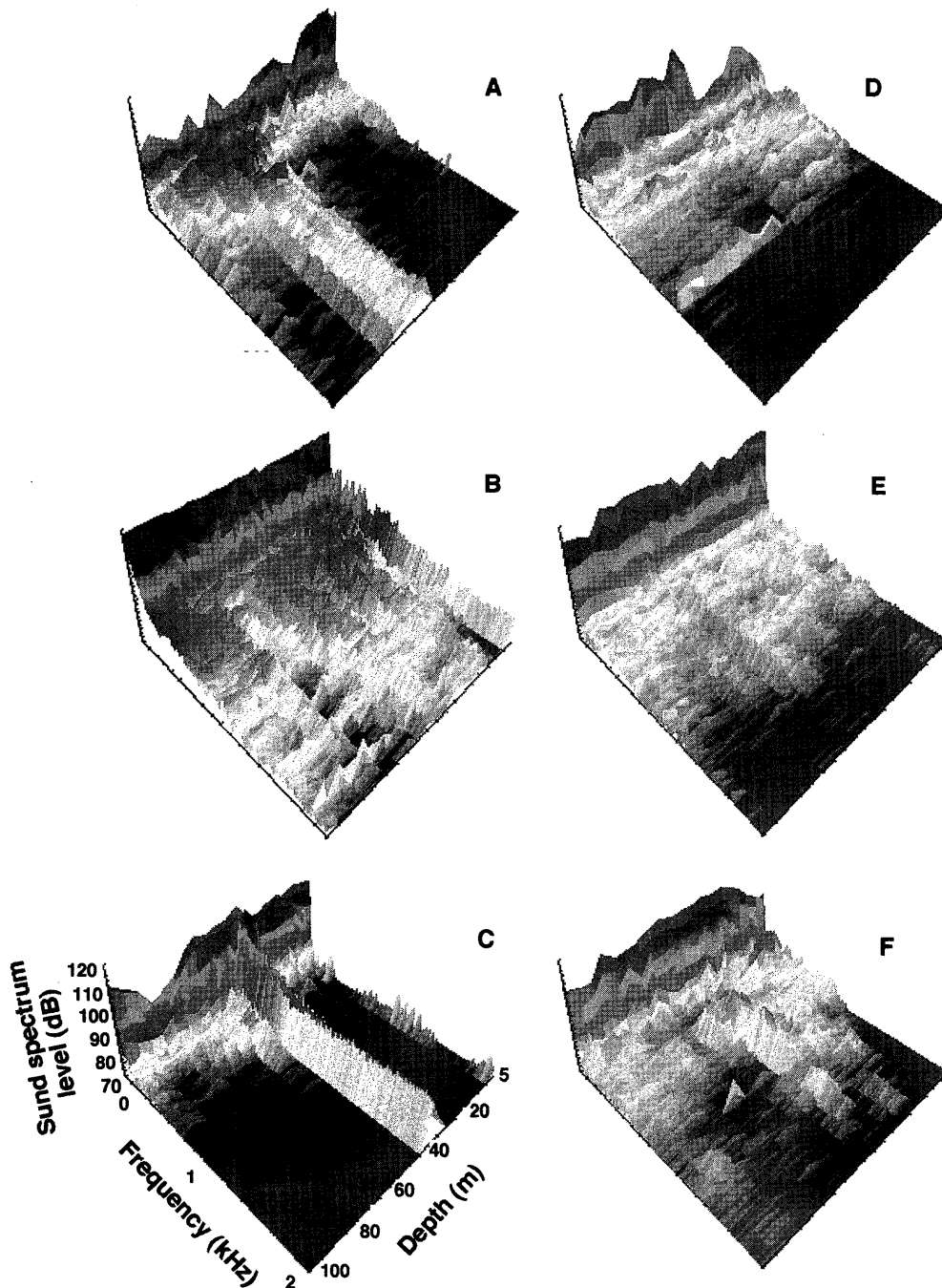


Fig. 2-6 The sound spectrogram (0~2 kHz) of vertical variation in ambient noise (0 dB re $1 \mu \text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

Fig.2-7, 2-8は、F点深さ100mにおける23分間のスペクトル変化を10kHz以下および2kHz以下の周波数範囲で示したものである。福山沖Fでは、鉛直特性と時間変化の両者とも、250Hz~1kHzのスペクトルレベルが高く、6kHz以上のスペクトルレベルが55dB以下と低い傾向を示した。以上のように同一海域において

も測定点によって雑音背景が異なるため、周囲雑音は異なった。

各測定点の周囲雑音の鉛直分布を比較するため、Fig.2-5のスペクトログラムの各階調別確率頻度分布をFig.2-9に示す。全体を通しスペクトルレベルの最大頻度は、50dB以上65dB未満の階調に属し、50dB以下

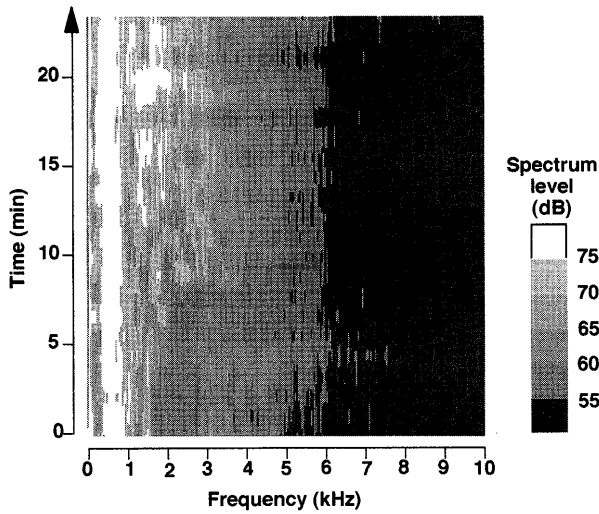


Fig. 2-7 The sound spectrogram (0~10 kHz) of ambient noise in a hydrophone depth of 100 m off Fukuyama (F) (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

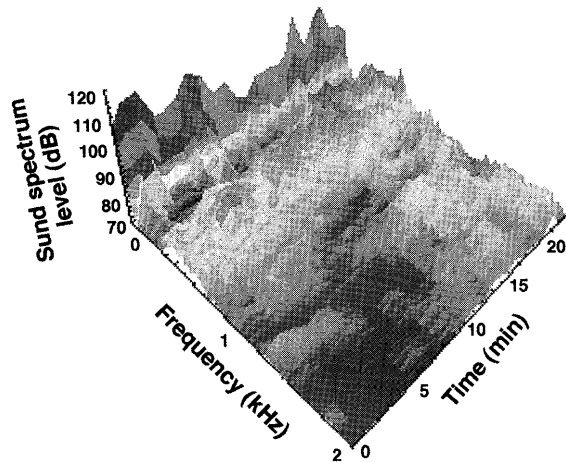


Fig. 2-8 The sound spectrogram (0~2 kHz) of ambient noise in a hydrophone depth of 100 m off Fukuyama (F) (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

のスペクトルレベルはほとんど出現しなかった。各測定点を比較すると、三船沖 A は、60dB 以上 65dB 未満の階調の頻度が最大となり、他の測定点に比べ 5dB 高く、60dB 以上の頻度が全体の 68% を占め、測定点中最もスペクトルレベルが高い海域であった。また大崎ヶ鼻沖 B も 60dB 以上のスペクトルレベルの頻度が全体の 61% を占め、三船沖 A に近い傾向を示した。しかし大崎ヶ鼻沖 C、白浜沖 D および中央部 E は、60dB 未満のスペク

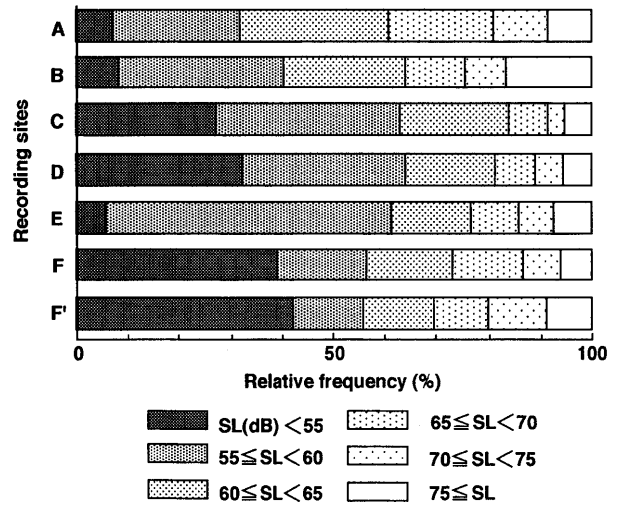


Fig. 2-9 Frequency histograms of the sound spectrum level (SL) in Fig. 2-5 and Fig. 2-7 (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

トルレベルの頻度が約 60% を占め、前 2 点に比べ全体的にスペクトルレベルが低い海域であった。特に中央部 E は、55dB 以上 60dB 未満のスペクトルレベルの頻度が全体の 56% を占めた。福山沖 F は、鉛直特性および時間特性を示す 2 種類のスペクトログラムとも各階調の頻度がほぼ等しく、他の測定点に比べ 55dB 未満の低スペクトルレベルの頻度が全体の約 40% とスペクトルレベルの低い海域であった。

このように 60dB を境に測定点によってスペクトルレベルの頻度が異なることから、Fig. 2-10 に 60dB 未満、60dB 以上 65dB 未満、65dB 以上の 3 階調のスペクトログラムを示し、その分布を比較した。三船沖 A および大崎ヶ鼻沖 B では、ハイドロホン深さによってスペクトルレベルが激しく変動し、65dB 以上のスペクトルレベルが 3kHz 以上にまで達した。大崎ヶ鼻沖 C、白浜沖 D では、水深が増すほど 60dB 以上 65dB 未満のスペクトルレベルが 5kHz 以上の広帯域に広がり、中央部 E では、スペクトルレベルの鉛直変動が見られず、全水深を通じて 4kHz~8kHz 間のスペクトルレベルの減少率が $-0.1\text{dB}/\text{octave}$ と唯一増加傾向にあった。また福山沖 F は、65dB 未満のスペクトルレベルが 5kHz 以上に達せず、4kHz~8kHz 間のスペクトルレベルの減少率が $6.7\text{dB}/\text{octave}$ と最も大きいことから、高周波成分が低い水域となった。

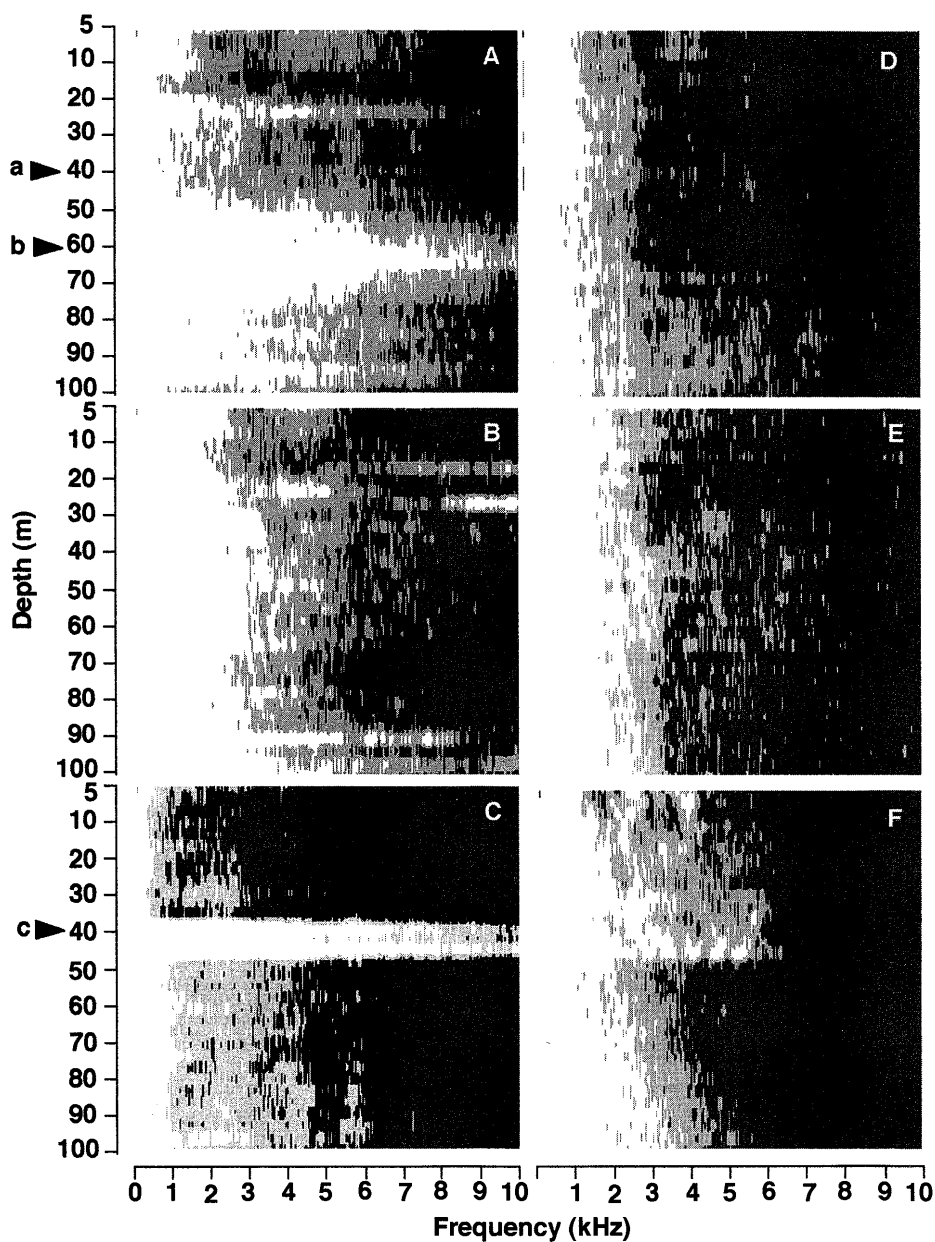


Fig. 2-10 The sound spectrograms (0~10 kHz) of vertical variation in ambient noise by 3 scales (under 60 dB, 60~65 dB, over 65 dB; 0 dB re $1 \mu \text{ Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

2) 周囲雑音の日周変化

Fig. 2-11 にテンプラノイズの発生頻度と水中音圧レベルの時間変化、および周囲雑音の日周変化をスペクトログラムで示す。なおスペクトログラムは測定間隔が不均一なため、表示に不足する部分は各測定時刻前のデータを使用した。測定日の日没、日出はそれぞれ19時26分、5時21分であった。

テンプラノイズの発生頻度は、日没後1時間20分後の

20時45分頃と日出後4時間後の9時15分頃が最も多く、日中に頻度が低下した。これをスペクトログラムで見ると、生物雑音の頻度が高い日出後の時間帯では、1 kHz以上のスペクトルレベルが強くなった。また水中音圧レベルは、正午を除いて午前中から午後18時45分まで高く、夜中は日中に比べ20dB程度低下した。日中のスペクトルレベルは、250Hz以下と600Hz以上の周波数帯で強く、夜になると全体的にスペクトルレベルが低

くなり、特に100Hz~500Hzの周波数帯で55dB以下に低下した。これはテンプラノイズの発生頻度と逆の傾向を示す。

2.3.2 鹿児島港周辺海域

1) 海上交通特性

海上交通量 Fig.2-12に観測期間中の1時間交通量の時間変動を示す。見通し線上を通過した船舶は平均

174隻/日で、日中(6~20時)の通航が平均約11隻/時で全体の84%を占め、夜間(23~5時)に船舶の通航がない日中集中型の通航特性を示した。Fig.2-13に南北別平均1時間交通量を示す。海上交通量のピークは、朝の9~10時で平均15隻/時となり、南北の交通量の差はほとんど見られない。Fig.2-14に観測期間中(168時間)の船種別1時間交通量を示す。これより不定期船を除く船舶は、主に日中通航し、特に漁船が午前中の通航船舶

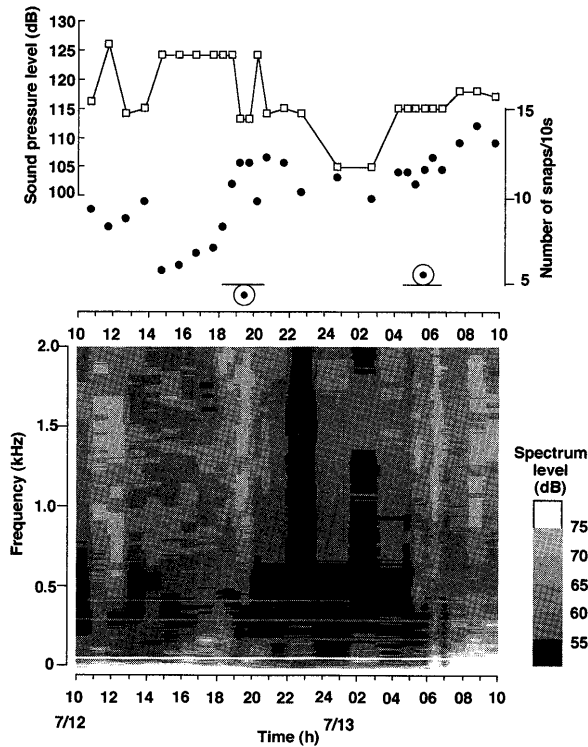


Fig. 2-11 The sound spectrogram of diurnal variation in ambient noise and relationship of the sound pressure level (□, 0 dB re 1 μ Pa) and the number of snaps (●) to time of day at Yojirou-ga-hama (G).

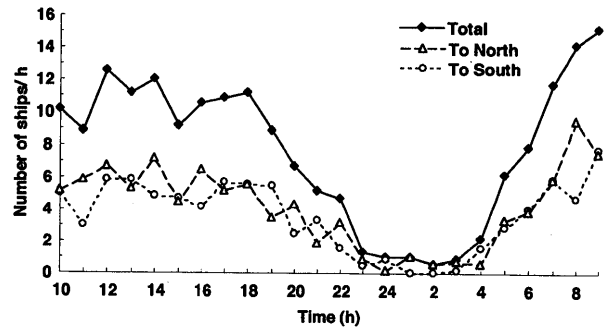


Fig. 2-13 Temporal variation of one week average marine traffic value.

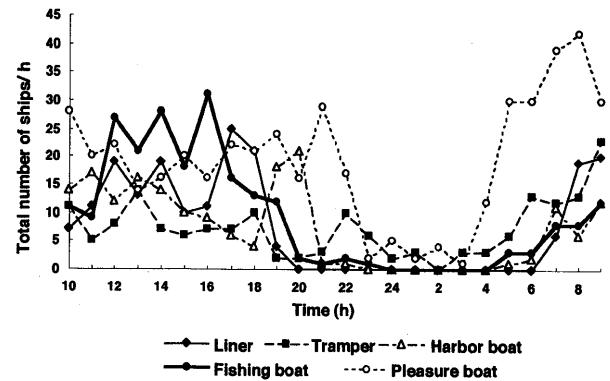


Fig. 2-14 Temporal variation of total traffic value by five vessel styles for 7 days.

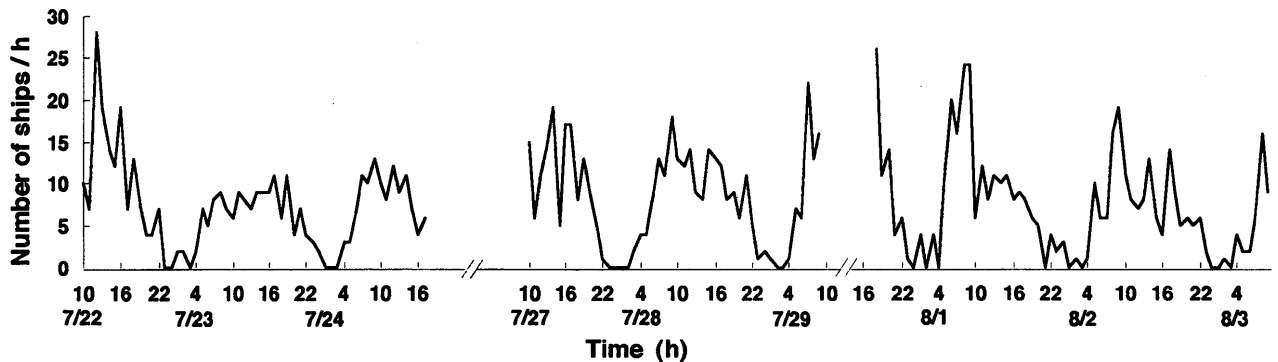


Fig. 2-12 Temporal variation of traffic value crossing on PP' line from July 22 (10:00), 1997, to August 3 (06:00), 1997.

の半数を占めた。また Fig. 2-15 に曜日別通航船舶数とその船種構成を示す。これより全曜日を通じて漁船とプレジャーボートの小型船舶が当水域を通航する船舶の半数以上を占め、特にプレジャーボートは曜日別交通量の変動が大きく、日曜日に増加する傾向を示した。

船舶航跡 桜島水道南部水域の通航帯と通航率を Fig.

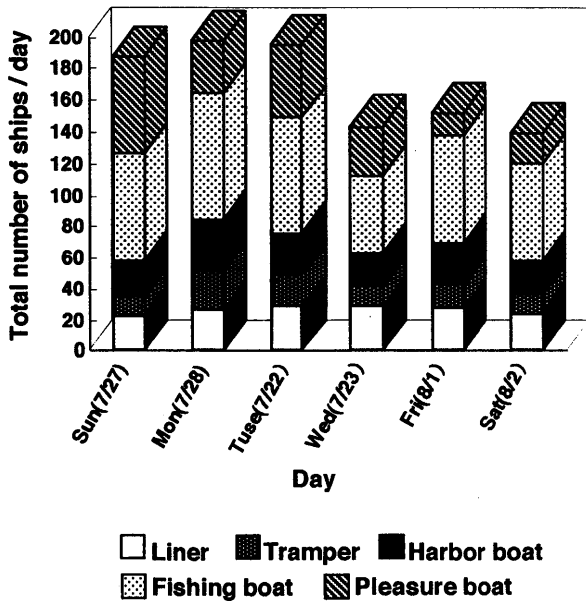


Fig. 2-15 Variation of the daily traffic value.

2-16 に示す。当水域の主要通航帯は、①桜島水道を通る出入港船の通航帯（出入港通航帯）、②垂水鴨池港間のフェリー通航帯（フェリー通航帯）、③与次郎沖を通る港内移動船の通航帯（港内通航帯）の3通航帯に区分され、観測された総船隻数（141隻）に対する各通航帯の通航率は、出入港通航帯27%、フェリー通航帯西航船21%、東航船21%、港内通航帯16%であった。なお湾奥海域へ向かう船舶は全体の6%で、桜島～鹿児島市間のフェリー通航帯以北の桜島水道北部水域は、南部水域に比べ船舶通航密度が粗な海域となっている。船舶通航密度を Fig. 2-17 に示す。この図は、当水域を0.2海里メッシュに区切り、そのメッシュ内を通航した船舶数から船舶通航密度を求めたものである。船舶通航密度が特に高い水域は、Fig. 2-16 に示す2通航帯の合流・交差点にあたる桜島水道最狭部の神瀬～甲突川河口間、鴨池港沖および鴨池港～沖小島間の3水域で、 4×10^{-2} 平方海里当たり45隻を超えた。Fig. 2-18 に通航船舶の6時間ごとの航跡解析結果を示す。Fig. 2-13 にも示したように日中6時～18時は、3通航帯とも頻繁に通航していたが、18時以降では港内通航帯の通航が見られなくなった。また夜中0時～6時では、前述したPP'線以外の水域においても船舶の通航はほとんど見られない。これより当海域の通航密度が高くなる現象は日中に限られる。

各通航帯の通航特性を得るために Fig. 2-19 に各通航

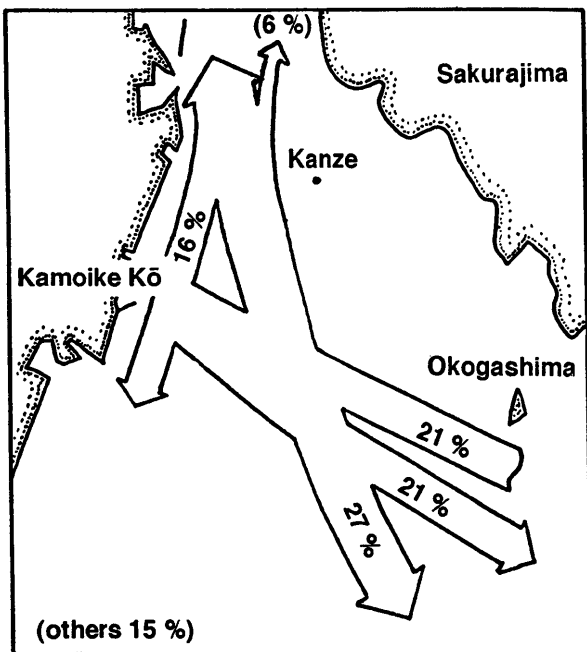


Fig. 2-16 Main traffic lanes and traffic ratio in the Kagoshima Port.

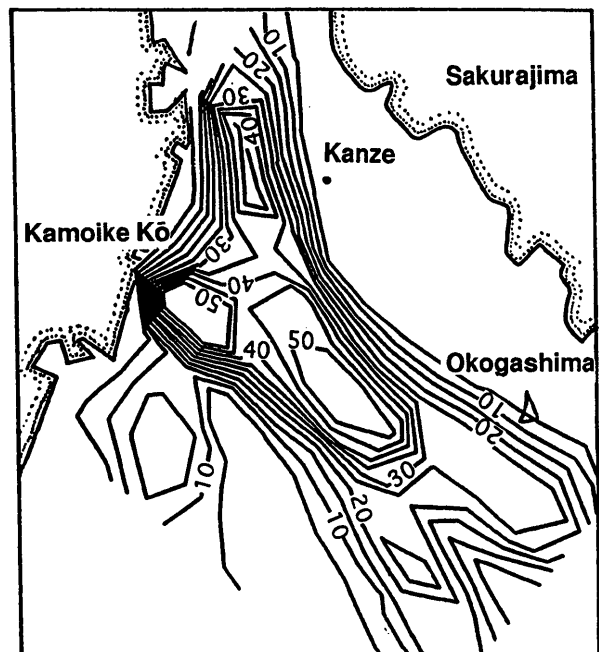


Fig. 2-17 Density chart of tracks in the Kagoshima Port (Unit in ships / 0.04 miles²).

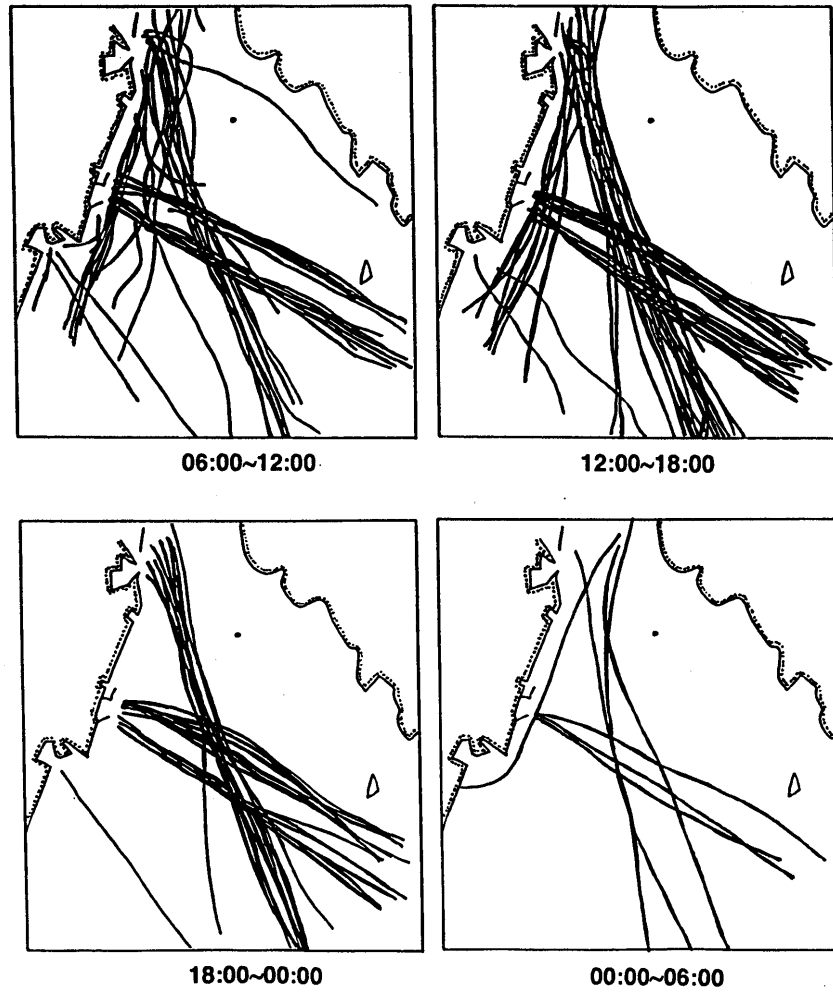


Fig. 2-18 Distribution chart of tracks by time zone in the Kagoshima Port.

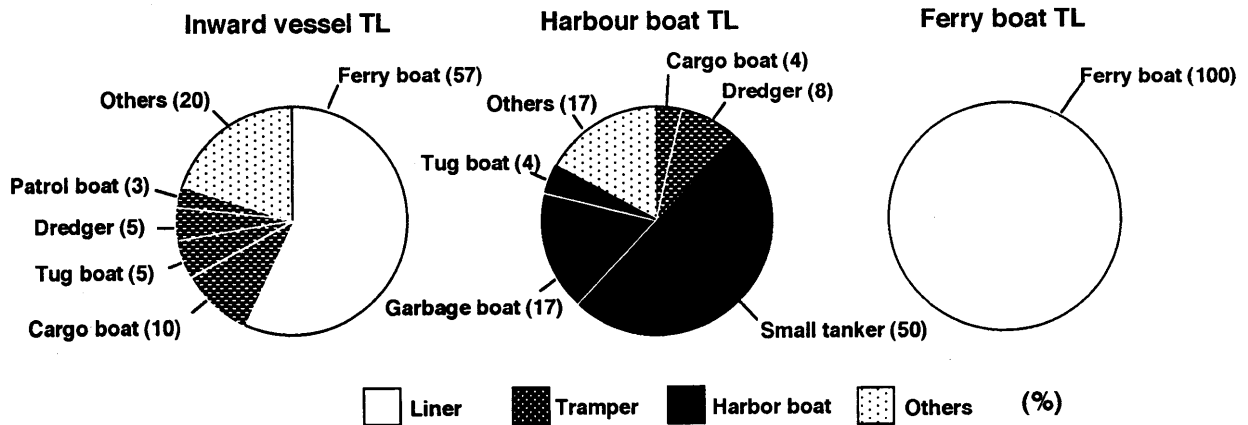


Fig. 2-19 Comparison of the percentage of passed boat on three traffic lanes (TL).

帯の船種構成を、Fig.2-20に速力分布を示す。フェリー通航帯は、フェリーのみの単一船種構成のため、速力は14~18ノットでほぼ一定し、夜間(24時~6時)には通

航がない。一方、出入港通航帯は、船種構成が多様なため、12~40ノットと船速分布の幅が広く、特に40ノット以上の高速船が存在する。また離島航路定期船および不

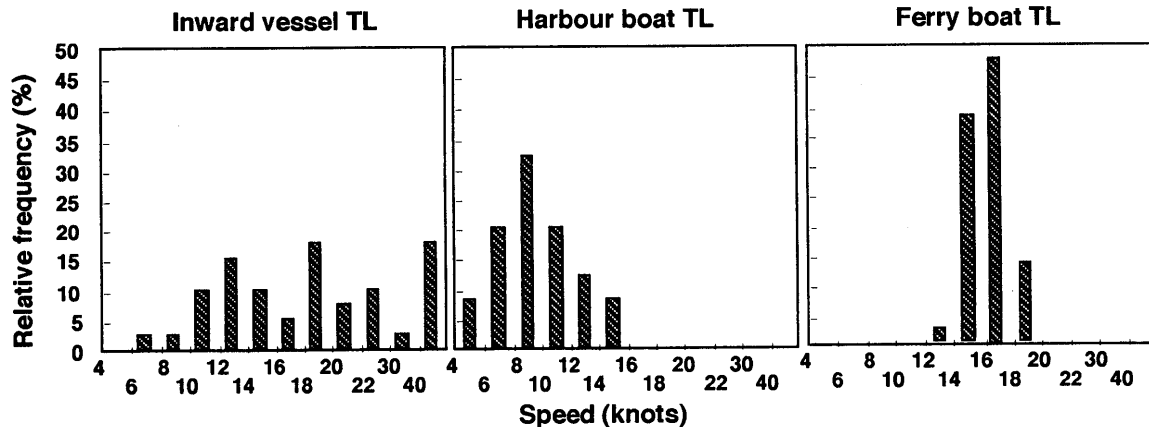


Fig. 2-20 Comparison of the relative frequency of cruising speed for three traffic lanes (TL).

定期貨物船が2/3を占めるため、18時以降も通航が見られる。しかし港内通航帯は、船舶燃料を運搬する小型油槽船が半数を占めるため、8～10ノットの低速船が中心でFig.2-18で示したように日中の通航が主となる。

2) 周囲雑音の水域別特徴

Fig.2-21に船舶通航帯と観測点を示す。またFig.2-22にH～N点における周囲雑音の時間変化をスペクトログラムで示す。なお収録時の航走船舶をTable2-3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、特に水深40m以浅のH～K、N点では1.5kHz付近までのスペクトログラム上に干渉縞模様が現れた。以下に各測定点における周囲雑音の特徴について説明する。なおここでは水深をd、ハイドロホン深さをhで示す。

鹿児島本港沖 鹿児島本港沖 H ($h=5\text{m}$) における1/3オクターブバンドレベル（以下バンドレベルと呼び、周波数はその中心周波数を示す。）の時間変化と航走船舶の最接近時（▲）をFig.2-23に示す。なお図には1オクターブ間隔に中心周波数32Hz, 63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hzおよび1kHzの結果を示す。静寂時（12時20分～24分）、125Hz以上のバンドレベルは110～115dBを示したが、32Hz, 64Hzのバンドレベルは船舶の有無に関係なく115～135dBと大きく増減した。一方当点は0.1海里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、スペクトログラム上のc, e, f に干渉模様が現れた。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

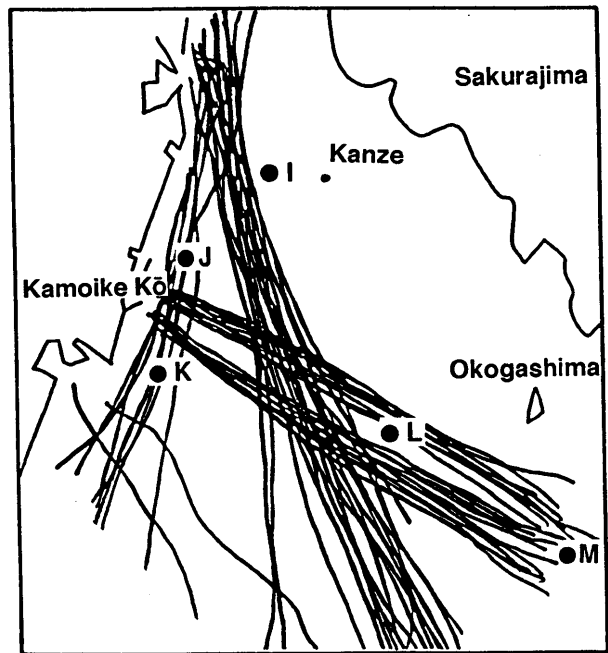


Fig. 2-21 Distribution chart of tracks (12:00~18:00) and recording sites of ambient noise.

数が高いほど大きい。しかし高速船は位相変化が速いため、スペクトログラム上の干渉模様は通過後のわずかな間しか現れなかった。

桜島水道中央部 桜島水道中央部の神瀬沖 I ($h=10\text{m}$) におけるバンドレベルの時間変化をFig.2-24に示す。静寂時（12時19分～21分）のバンドレベルは、32Hz～125Hzで約110dB, 250Hz, 500Hzで約118dBを示した。しかし狭水道中央部の当点では、船舶が0.1海里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

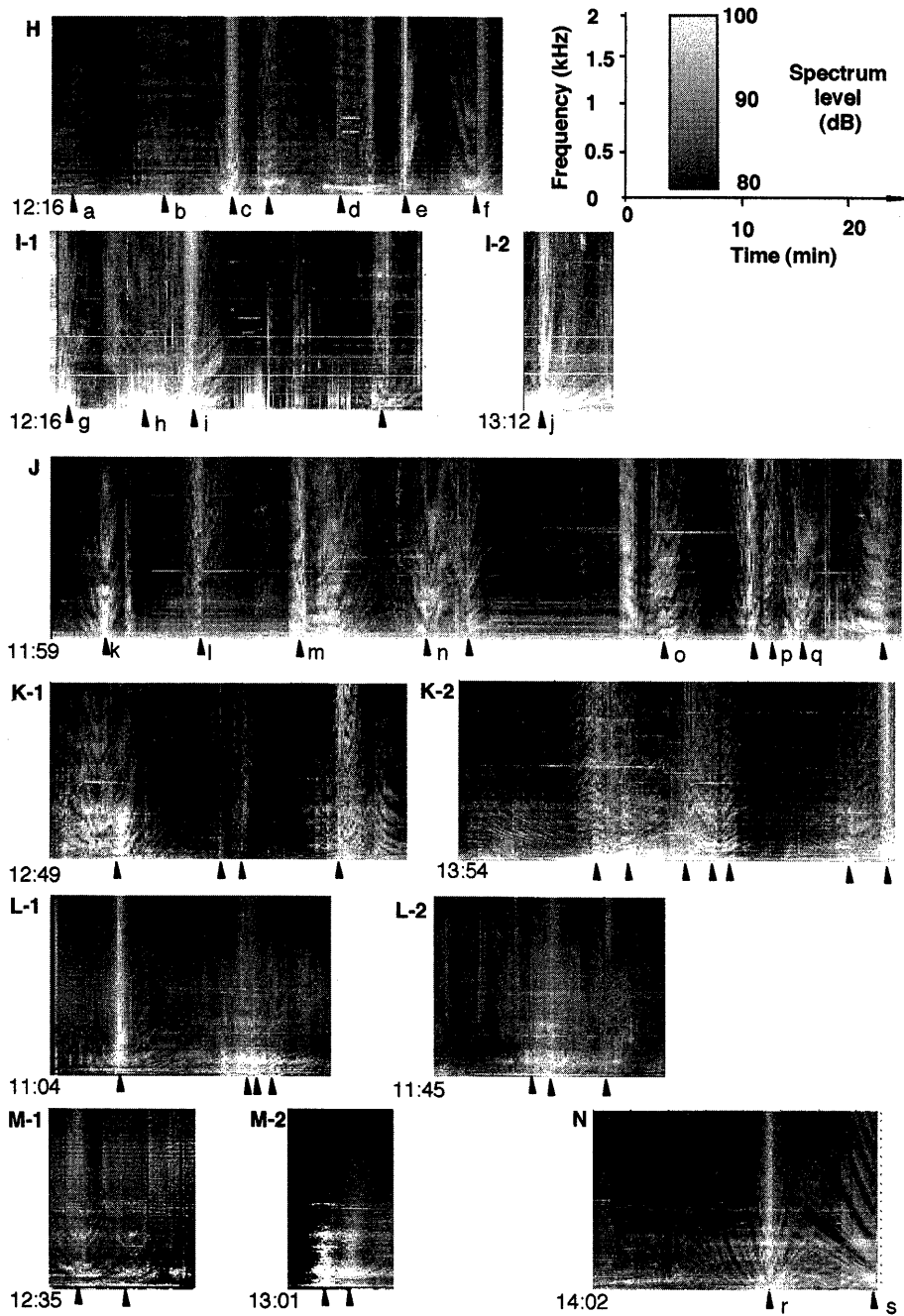


Fig. 2-22 The sound spectrograms of ambient noise at H~N.
 Closed triangles, closest point of approach (CPA) of cruising vessel (0 dB re $1 \mu \text{ Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

Table 2-3 Type of passed vessels during the recording

Recording site	Vessel No.	TCPA* ¹	Vessel's type	G/T* ²	Couse	CPA* ³
H	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
	J	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
I-1	f	12:55	ferry boat(S)	586	E	0.05
	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
I-2		12:46	cargo boat	498	N	0.1
	j	12:01	cargo boat	498	N	0.1
J	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	tug 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
K-1		12:58	cargo ship	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
K-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
L-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
L-2		11:55	ferry boat(T)	1503	W	0.3
		11:56	ferry boat(T)	1498	E	0.2
		12:01	jetfoil	163	N	—
M-1		12:38	ferry boat(T)	1196	W	0.3
		12:42	ferry boat(t)	1498	E	0.3
M-2		13:04	ferry boat(T)	1503	W	0.3
		13:07	ferry boat(T)	1473	E	0.3
N	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: Tarumizu ferry.—*⁶: no data.

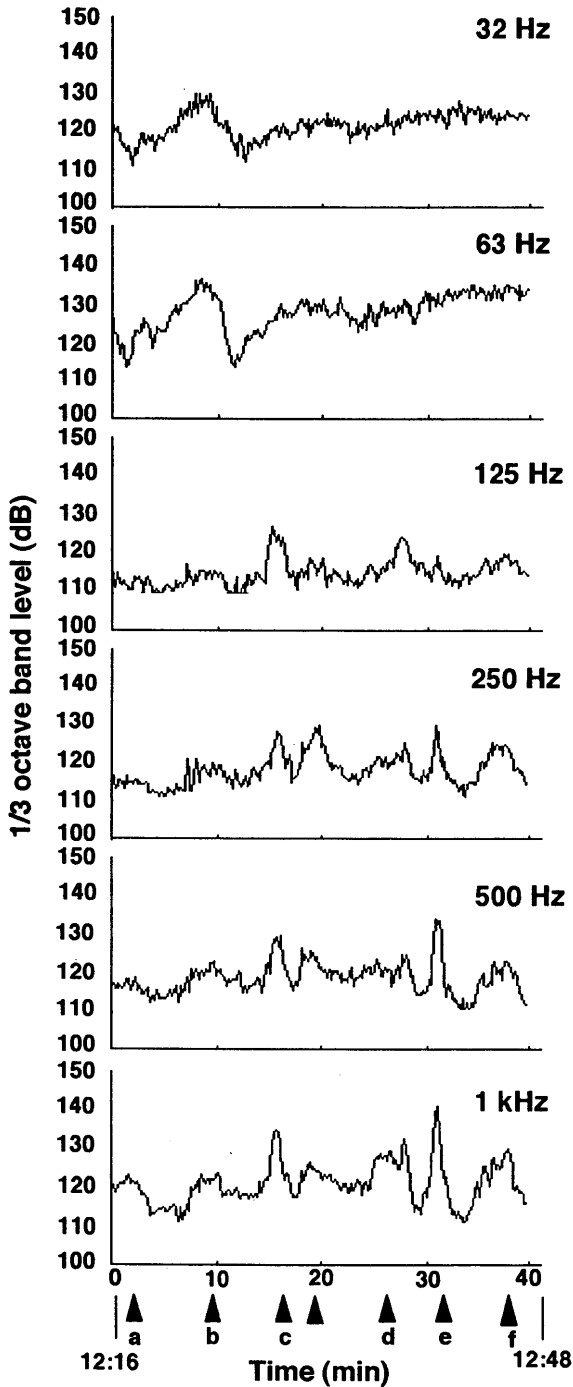


Fig. 2-23 Temporal variation of the 1/3 octave band level (0 dB re $1 \mu\text{Pa}$) at H.

Closed triangles, CPA of cruising vessel; frequency, center frequency of 1/3 octave band at intervals of one octave band (32 Hz~1 kHz).

ドレベルの増加が激しく、32Hz、125Hzでは約35dBも増加し、最大音圧は145dBにも達した。また砂利運搬船hの航走雑音は、最接近距離がジェットフォイルgの0.1海里や離島航路フェリーiの0.08海里に比べ0.3海

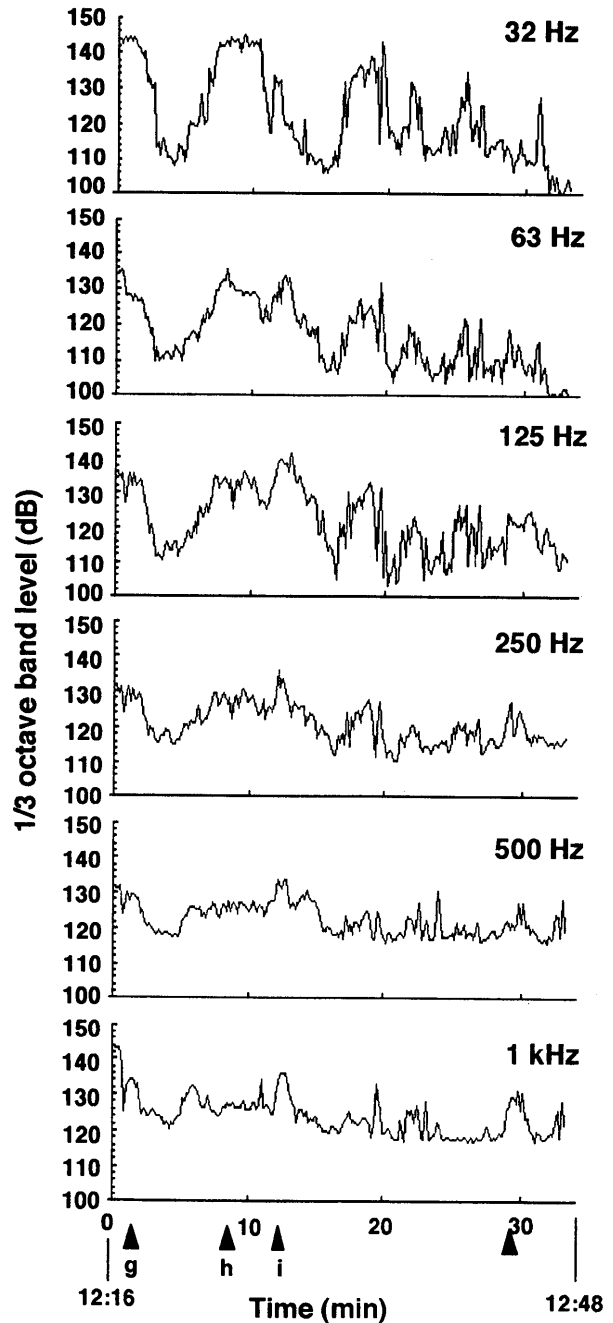


Fig. 2-24 Temporal variation of the 1/3 octave band level (0 dB re $1 \mu\text{Pa}$) at I.

Legends as in Fig. 2-23.

里と遠いにもかかわらず、32Hzのバンドレベルのピーク値は145dBと高く、速力が遅いため持続時間も約3.5分間と長かった。

鴨池港沖 鴨池港北方0.3海里沖 J (h=10m) にお

るバンドレベルの時間変化を Fig. 2-25 に示す。中心周波数 32 Hz, 63 Hz のバンドレベルは、船舶の航走に関係無くそれぞれ約 140 dB, 約 130 dB で一定であった。また静寂時 (12 時 40 分 ~ 52 分) の 125 Hz 以上のバンドレベルは 118 ~ 120 dB と、H, I 点に比べやや高い値を示した。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。両者とも急峻なピークは 250 Hz 以上に現われ、特に 500 Hz, 1 kHz では急激に 17 dB 増加した。このような変化は、ジェットホイール l, p にも見られ、250 Hz で 5 dB, 1 kHz で 15 dB 増加した。また出入港時のなだらかなピークには、スペクトログラム上に干渉模様を見ることができた。

鴨池港南方 0.5 海里沖 K (h=5m, 24m) における 32 Hz, 125 Hz, 1 kHz のバンドレベルの時間変化を Fig. 2-26 に示す。K 点では、J 点同様、両深さの 32 Hz 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 (K-1 ; 13 時 07 分 ~ 11 分, K-2 ; 14 時 19 分 ~ 22 分) の 125 Hz, 1 kHz のバンドレベルは、h=5m で 108 dB, 112 dB, h=24m で 110 dB, 116 dB を示し、表層 (h=5m) より底層 (h=24m) で若干高かった。またスペクトログラム上では、表層よりも底層において干渉による縞模様が細かくなることが認められた。ただしここでは、J 点で見

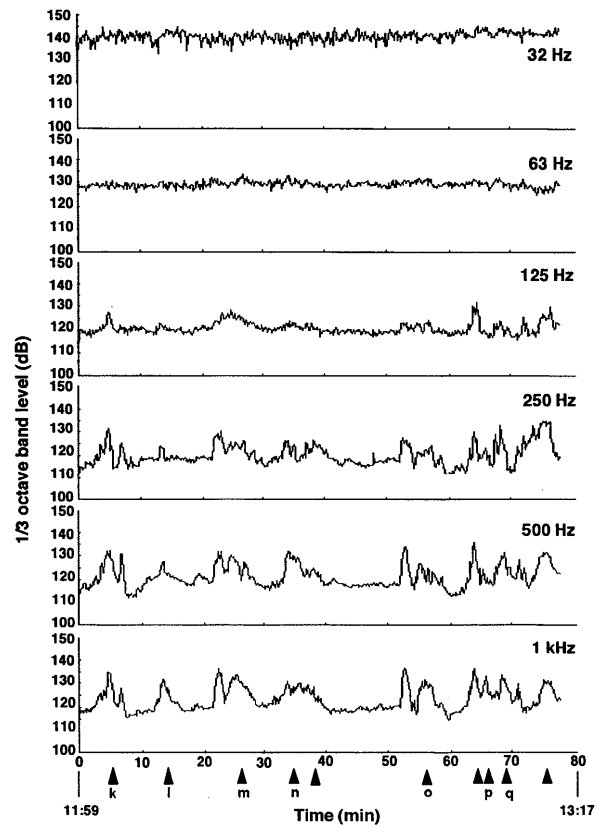


Fig. 2-25 Temporal variation of the 1/3 octave band level (0 dB re 1 μ Pa) at J. Legends as in Fig. 2-23.

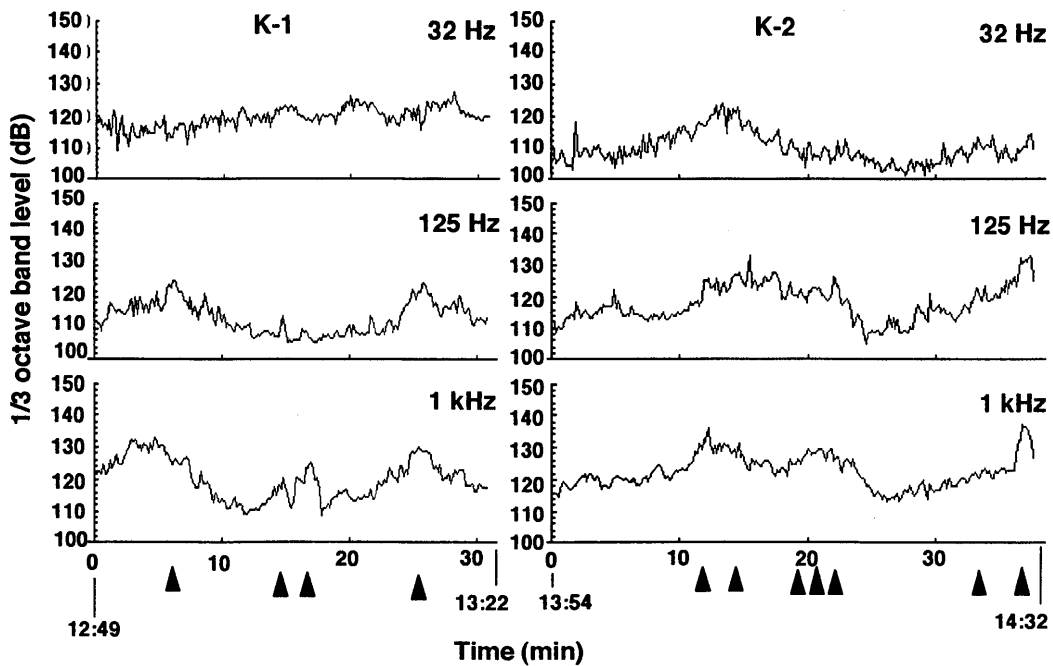


Fig. 2-26 Temporal variation of the 1/3 octave band level (0 dB re 1 μ Pa) at K. Legends as in Fig. 2-23.

られた出入港時の二山型を示すバンドレベルの変化は見られなかった。

沖小島沖および谷山港沖 沖小島西沖Lおよび沖小島南沖Mの表層 ($h=10\text{m}$) では、Fig.2-22のスペクトログラム (L-1, M-1) 上に干涉模様が認められたが、中層 (L-2, M-2) では、干涉模様を確認することはできなかった。また垂水フェリーの離合部となる沖小島南沖Mでは、航走雑音のピークが連続して現われ、さらに谷山港沖N ($h=10\text{m}$) では、出港船rと入港船sの干涉模様が重なるのが認められた。一方L, N点では、静寂時 (L-1; 11時12分~19分, L-2; 11時49分~52分, N; 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かった。なおN点では静寂時低周波のバンドレベルが高い特徴は見られなかった。

2.4 考察

2.4.1 沿岸域の周囲雑音の特徴

周囲雑音の解析には、できる限り雑音背景を限定して収録する必要がある。ここでは外洋からの海況雑音や船舶放射雑音による影響が比較的小さい半閉鎖的内湾である鹿児島湾奥部海域を選んだが、実際は、船舶航走雑音の存在によって必ずしも静寂な水中音環境でないことがわかった。

例えば、周囲雑音の鉛直測定の結果より、三船沖Aおよび大崎ヶ鼻沖Bでは、ハイドロホン深さによってスペクトルレベルが激しく変動し、65dB以上のスペクトルレベルが3kHz以上にまで達した。この変動は、時刻によって変化する周辺養殖場の船舶の海中放射雑音を一本のハイドロホンを順次降下させて測定したためと考えられる。また大崎ヶ鼻沖Cでも、特定の深さのみに航走船舶からの海中放射雑音が現れた。このように沿岸域での周囲雑音の収録では、高速で移動し、かつ高出力の雑音を放射する船舶の影響を避けることはできない。

一方生物雑音の中でもテンプラノイズは、海岸付近のA~D点で聴くことができ、特に大崎ヶ鼻沖C, 白浜沖Dでは、水深が増すほど60dB以上65dB未満のスペクトルレベルが5kHz以上の広帯域に広がった。しかし中央部Eでは、A~D点とほぼ同一水深でありながらテンプラノイズは聴こえず、スペクトルレベルも全水深を通じて4kHz~8kHz間で減少率が逆に -0.1dB/octave と唯一増加傾向となった。よってテンプラノイズは、海底にその音源があり、水域によって分布が異なると推察される。

さらに“たぎり”上の福山沖Fは、65dB未満のスペクトルレベルが5kHz以上に達せず、4kHz~8kHz間のスペクトルレベルの減少率が 6.7dB/octave と最も高かった。よってこの水域では、高周波成分が低く、“たぎり”音は200Hz~500Hzの低周波成分が主であると推察される。

また周囲雑音の日周変動は、日没後にテンプラノイズの発生頻度が上昇し、250Hz以下のスペクトルレベルは、午前・午後が高く、昼食時および夜間低下した。特に後者の日周変化の原因は、この長水路の防波堤沿いに道路があり、周辺陸部は新県庁々舎建設工事等が盛んに行われていたことから、作業音や自動車騒音などの人工騒音によると推察する。よって沿岸域における周囲雑音の日周変動は、生物雑音だけでなく、人間活動により発生する人工雑音によっても生じると言える。

以上のように浅海沿岸域の周囲雑音の変動原因は、航走船舶や周辺養殖場の船舶から放射される高出力の海中放射雑音の存在、生物雑音や陸上人工雑音源の分布、またその活動の日周変化などさまざまな要因が複合されたものであり、その中でも特に船舶航走雑音の影響は大きい。ただし、浅海沿岸域の周囲雑音は、海域、時刻によって自然雑音や船舶放射雑音および陸上雑音などの雑音背景が異なるため、これまでの多くの報告^{12, 16, 18, 19, 117, 136)}と今回の結果を単に比較することはできない。

2.4.2 港湾域の周囲雑音の成因と特徴

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、周囲雑音の日周変化は、海洋生物による雑音が日没後、日没後それぞれにピークを持ち、^{115, 117)} 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Kで見ると限り表層 ($h=5\text{m}$) より底層 ($h=24\text{m}$)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、生物雑音や自然雑音の影響よりもむしろ船舶放射雑音に強く依存し、船舶交通量、船舶通航帯、地形、および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、港湾域の水中音環境の成因とその特徴について述べる。

鴨池港沖J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周囲雑音に大きな影響を与えている。出港時の二山型の音圧変化は、航行状態の目視観測より判断すると、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500Hz, 1kHzのバンドレベルが瞬時に17dBも増加する現象は、離岸時の後進発令によ

て生じるプロペラ雑音の影響と推察される。一方入港時では、干渉模様を持つ航走雑音が入港直前に一時消え、その後250Hz以上に小さなピークが生じる。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J点と同じく港出入口の防波堤から0.3海里の距離である鹿児島本港沖Hでは、着岸岸壁が防波堤からさらに0.5海里奥にあるため、そのような音圧変化は認められなかった。よって出入港時に見られる二山型の海中放射雑音の変化は、港外に開けた港周辺特有の水中音環境を示す。一方、L、N点では静寂時低周波のバンドレベルが高い特徴は見られなかった。これは松野ら⁹⁾が示した潮流の影響と推察される。

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¹²⁷⁾と呼ばれる特有な現象が生じる。早坂ら¹³⁷⁾によると、当海域の底質は砂質であり、Liebermann¹³⁸⁾は砂質が最も海底反射係数が高いとしている。これより当海域の周囲雑音のスペクトログラム上には、船舶航走雑音の直接波と海面・海底反射波の干渉により、Fig.2-22に示したような縞模様が見られる。第4章で述べる浅海における航走雑音の干渉理論によると、干渉模様の複雑さは、伝搬経路数によって決まり、それには水深と伝搬距離が関係する。また水深が深いほど干渉縞模様は細くなり、反射面の状態や音線の屈折の影響を受けるため、水深が183mのM点や海底地形が急斜面となるE点の中層では認められなかった。一方ジェットフォイルやモーターボート等の高速船では、時間当りの位相変化が激しいため、今回の解析間隔では干渉の変化を模様として読み取ることができなかった。しかし一般船舶が接近してくる場合のスペクトログラム上には、干渉の影響によってFig.2-22に示すように接近に伴って上昇してきた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(I-2-j)や、600Hz以下の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(N-r)が見られた。また船舶交通がふくそうする海域では、複数の船舶から放射された雑音が同時にハイドロホンで受波されるが、それらはFig.2-22のN点で見られたように互いに干渉することはなく、模様が重なるだけであった。

港湾域の周囲雑音は、以上に述べた音源の音響特性や音波の伝搬特性だけでなく、交通量の日周変化や曜日変化、船舶航路による通高密度などの海上交通特性によって変化する。特にFig.2-17に示す桜島水道最狭部の神

瀬～甲突川河口間、鴨池港沖および鴨池港～沖小島間の3海域のような船舶通航密度が高い2通航帯の合流・交差部では、水中音圧が1日に140dB以上に達する頻度が45回を超えることが予想される。また当水域では、船速の速いジェットフォイルや小型漁船、プレジャーボート等が航走するため、音圧の急激な上昇も頻繁に生じる。

以上のように港湾域の周囲雑音は、船舶放射雑音の影響を強く受け、高速船による音圧の急増、音源の直上通過による大音圧などが生じ、さらに機関操作によって大きく海中放射雑音に変化することがわかった。また船舶通航密度や船舶通航帯との距離や、水深や海底地形などの音波の伝搬条件によって生じる干渉現象のため、港湾域の周囲雑音は空間的に大きく異なり、船舶交通量の時間変化によりそれらはさらに変化すると推察される。

第3章 停泊船舶から放射される海中雑音

船舶は、主機など多くの機械類が発する振動・騒音を高出力、広帯域の雑音として海中に放射するため、船舶交通量が多い沿岸域の水中音環境に最も影響を及ぼす。Urick¹²¹⁾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。よってプロペラ雑音のない錨泊中や観測および操業時などの停泊時では、船内機械の回転数により決定される線スペクトルが主となる。川上ら¹²⁶⁾は、浅海域における船舶航走雑音に干渉現象が現れることを示した。よって船舶直下にも、海底で反射した音波と直接波が干渉することが予想される。

本章では、停泊船舶から放射される海中雑音の直接波と海底反射波の干渉について、海底の反射特性と伝搬経路長による減衰を考慮して求めた理論値と水深の異なる海域で測定した実測値を比較して、停泊船舶直下の海中放射雑音の特徴について検討した。

3.1 供試船および測定海域

停泊中の船舶から海中へ放射される雑音の測定は、Fig.3-1に示す鹿児島大学水産学部練習船「南星丸」(83トン)を供試船に用いた。供試船の主要目及び測定条件をTable3-1に示す。

測定海域をFig.3-2に示す。停泊船舶の海中放射雑音の基本特性の測定は、水深が深く海底反射波の影響が無い鹿児島湾奥海域中央部水深135mのA点(31°39.8'

Table 3-1 Principal particulars of Nansei-Marun and recording conditions

		Recording site			
		A	B	B	C
Hull	Steel				
G.T (Gross tonnage)	82.97t				
L _{oa} (Length overall)	26.00m				
B _{mid} (Breadth moulded)	5.70m				
D _{mid} (Mould depth)	2.55m				
d _{mid} (Moulded draft)	2.10m				
Main engine	Diesel/400ps	600rpm	1100rpm	1100rpm	590rpm
Main motor	Diesel/70ps			1720rpm	1760rpm
Electric generator	50KVA			1720rpm	1760rpm

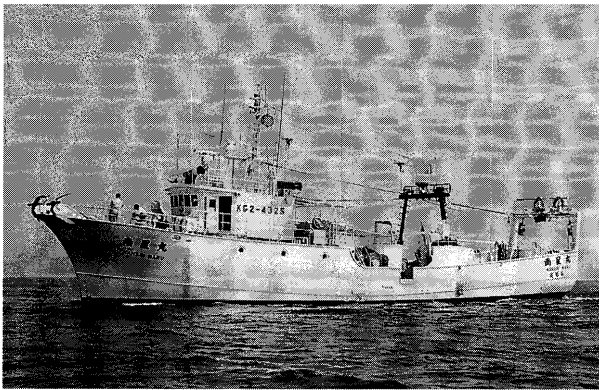


Fig. 3-1 Training ship "Nansei-Marun".

N, 130° 42.7' E) とした。また停泊船舶の海中放射雑音の鉛直特性の測定は、底質が反射係数の大きな砂質で、海底勾配が 1/100 と比較的平坦な同湾中央部海域西部平川沖水深 26m の B 点 (31° 27.1' N, 130° 32.7' E) および谷山港沖水深 93m の C 点 (31° 28.4' N, 130° 35.4' E) とした。測定時の天気は晴、風力階級は 1 で、測定時供試船の周囲 0.5 海里以内には航行する他の船舶は認められなかった。

3.2 測定および解析方法

B, C 点での測定は、通常の停泊時と同じ条件のクラッチ脱、主機回転数 590rpm、原動機および発電機回転数 1,760rpm で運転させた状態で行った。船舶からの海中放射雑音の測定方法を Fig. 3-3 に示す。海中放射雑音の基本特性の測定は、ロープを用いて供試船の主機直下水深 10m の位置にハイドロホン ST-1020 を吊して行った。また海中放射雑音の鉛直特性の測定は、船体中央部の海洋観測用手动ウインチを用いてハイドロホン ST-1005 を測定水深まで降下させて行った。測定水深は、水深 3m から 1m 間隔で海底に達するまでとし、各深さでの収録は 1 分とした。なおデータの記録方法は第 2 章

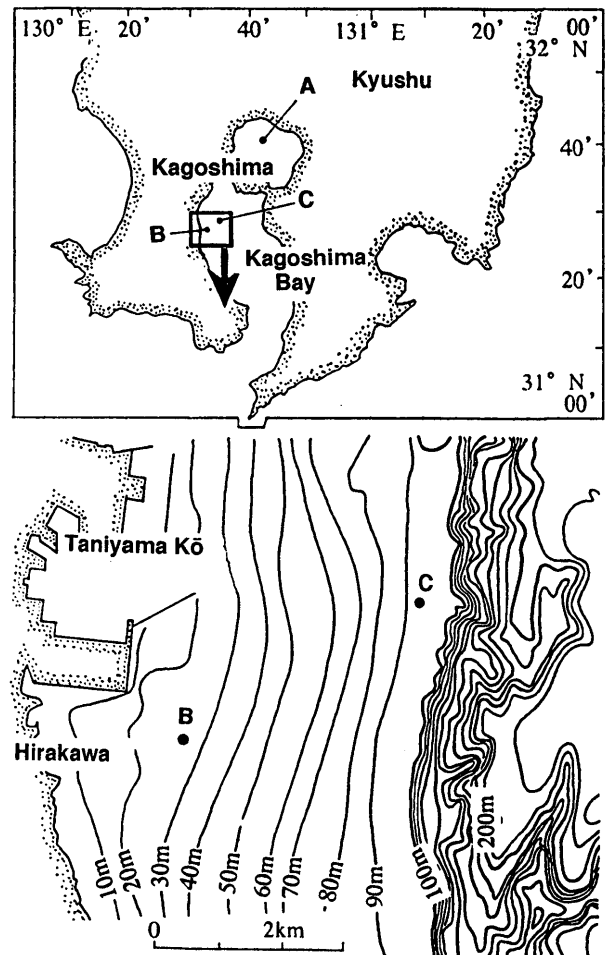


Fig. 3-2 Map of the recording sites (A~C) of underwater noise emitted by drifting vessel "Nansei-marun" in Kagoshima Bay.

と同様とした。

収録した放射雑音は、後に信号解析装置により周波数解析を行い、1Hz の帯域幅で 1 μ Pa を基準値としたスペクトルデータを作成した。なお周波数解析の積算平均処理回数はすべて 30 回とした。海中放射雑音の鉛直特性

は、各水深のスペクトルデータを用いて作製したスペクトログラムで示した。

3.3 干渉理論

3.3.1 干渉理論

停泊する船内機械類から船殻を経て海中に放射された音波は、水深が浅い場合、Fig.3-4に示すように音源Oから放射された後、直接伝搬路と海底反射路の二つの経路を経てハイドロホンQに至る。よってハイドロホンでは両経路の音波を同時に受波するため、干渉が生じる。Fig.3-5に干渉現象におけるハイドロホン深さと周波数の関係について示す。正の (constructively) 干渉は、位相差 ϕ が音波の周期Tの整数倍 (同位相) となったときに生じ、負の (destructively) 干渉は、そこから位相差 ϕ が $1/2T$ ずれ、両音波が逆位相となったときに生じる。位相の差は、同じハイドロホン深さでも周波数が異なる場合 ($f_1 \neq f_2$) や、同一周波数 ($f_3 = f_4$) でもハイドロホン深さ ($h_3 \neq h_4$) が異なる場合に生じる。このように音源直下の水中音場では、音波の周波数とハイドロホン深さによって2つの音波の位相がわずかつつ変

化するため、正と負の干渉が交互に生じ、鉛直方向のスペクトルを示すスペクトログラム上には縞模様が現われる。

次にこの縞模様の特徴について理論的に説明する。まず Fig.3-4より、ハイドロホンQにおける直接波と海底反射波の瞬時音圧 p_0, p_1 は、それぞれ、

$$p_0 = P_0 \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$p_1 = kP_0 \sin(\omega(t+\tau)) \tag{2}$$

と示される。ここに P_0 はハイドロホンにおける直接波の音圧振幅、 k は直接波の音の強さに対する海底反射波の音の強さの比、 t は時間、 ω は角速度、および τ はハイドロホンにおける直接波と海底反射波の遅延時間である。この遅延時間 τ は、伝搬距離差 $2(d-h)$ を音速 c

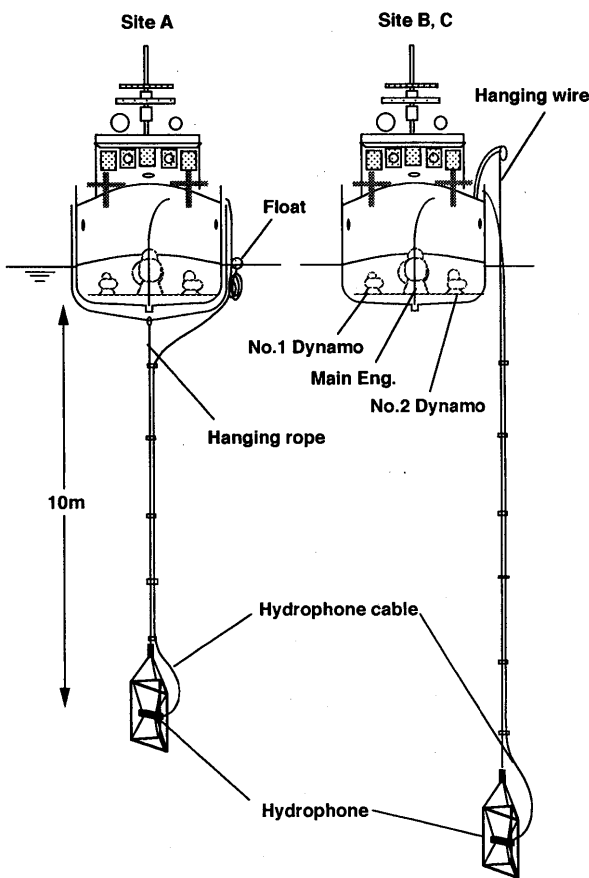


Fig. 3-3 Recording methods of the underwater noise emitted by drifting vessel "Nansei-Maru".

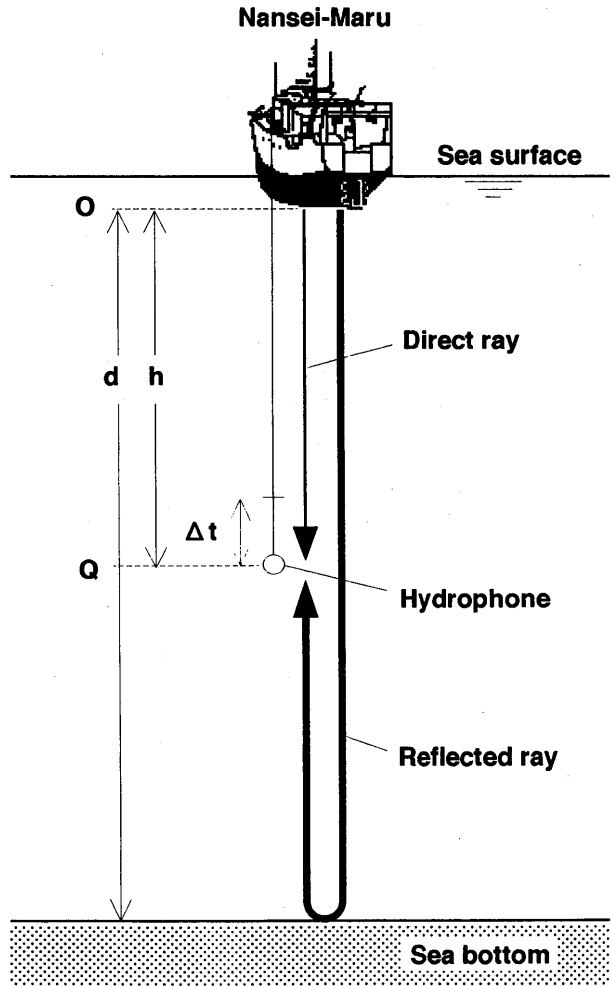


Fig. 3-4 Direct and reflected rays of underwater noise emitted by a drifting vessel.

O, sound source; Q, hydrophone; d, depth from the sound source to sea bottom; h, depth of hydrophone from sound source; Δt , recording period.

で割ったものであるから、

$$\tau = \frac{2(d-h)}{c} \quad (3)$$

となる。ここに d は音源から海底までの深さ、 h は音源からハイドロホンまでの深さである。直接波と海底反射波の二つの波が干渉したときの音圧 p は、

$$p = p_0 + p_1 \quad (4)$$

となり、その強さ I は、

$$I = \frac{\bar{p}^2}{\rho c} \quad (5)$$

となる。ここに ρ は海水の密度、 c は音速である。(5)式より平均の音の強さ I は、一定時間 T 当りの音圧 2 乗平均値であるから、(5)式に(1)、(2)、(4)式を代入し、

$$I = \frac{(p_0 + p_1)^2}{\rho c} = \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T (p_0 + p_1)^2 dt \quad (6)$$

$$= \frac{P_0^2}{\rho c} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}(k)^2 + k \cos(\omega t) \right)$$

が得られる。直接波のみの音の強さ I_0 は、

$$I_0 = \frac{P_0^2}{\rho c} \quad (7)$$

である。 I_0 を音源から 1m 離れた基準点における直接波の音の強さ I'_0 と直接波の伝搬距離 h で表すと、

$$I_0 = \frac{I'_0}{h^2} \quad (8)$$

となる。よって直接波と反射波が干渉したときのハイドロホンでの音の強さ I/I'_0 は、(6)、(7)、(8)式より、

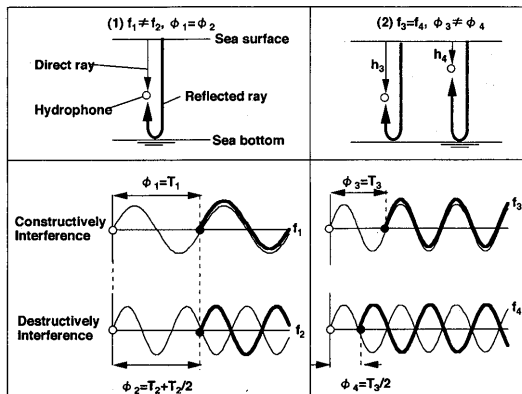


Fig. 3-5 Interference of the two sound waves effected by variation of transmission distance and frequency. f , frequency; ϕ , difference of transmission distance; T , term; h , depth of hydrophone.

$$\frac{I}{I'_0} = \frac{I}{I_0} \cdot \frac{I_0}{I'_0} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}(k)^2 + k \cos(\omega \tau) \right) \cdot \frac{1}{h^2} \quad (9)$$

となる。また直接波の音の強さに対する海底反射波の音の強さの比 k は、直線波の球面拡散減衰量と海底反射波の海底面の振幅反射係数 μ を考慮した球面拡散減衰量の比となることから、

$$k = \frac{\mu I_1}{I_0} = \frac{\frac{\mu P_0^2}{4\pi(2d-h)^2}}{\frac{P_0^2}{4\pi h^2}} = \frac{\mu h^2}{(2d-h)^2} \quad (10)$$

となる。よってハイドロホンにおける直接波と海底反射波の干渉を含む音の強さのレベル I_{IF} (dB) は、(3)、(9)式および $\omega = 2\pi f$ より

$$I_{IF} = 10 \text{Log} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}(k)^2 + k \cos \left(\frac{4\pi f(d-h)}{c} \right) \right) - 20 \text{Log} h \quad (11)$$

と表わすことができる。ここに f は音波の周波数である。

3.3.2 干渉周期

任意の周波数 f における干渉による音の強さ I_{IF} のピーク (正の干渉) は、(11)式より $\cos(4\pi f(d-h)/c) = 1$ のときのハイドロホン深さ h に存在する。したがって水面から i 番目のピークの深さ $H_{peak}(i)$ は、

$$H_{peak}(i) = d - \frac{c}{2f}(i-1) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

となる。これより任意の周波数 f における鉛直方向のスペクトルレベルの変化に見られる干渉のピーク間の距離 ΔH_{peak} は、

$$\Delta H_{peak} = H_{peak}(i+1) - H_{peak}(i) = \frac{c}{2f} \quad (13)$$

となる。よって鉛直方向に見られる直接波と海底反射波の干渉のピーク周期は、水深 d やハイドロホンの深さ h に関係なく、周波数 f のみによって決定される。すなわち干渉のピークは、海域の水深にかかわらず海底から同じ高さに現われることを示す。

3.3.3 干渉現象の解析限界

干渉効果の周期解析には、サンプリング定理より測定水深間隔によって解析周波数の上限が決定される。測定水深間隔 Δt と ΔH_{peak} の関係は、サンプリング定理より、

$$\Delta t \leq \frac{\Delta H_{peak}}{2} \quad (14)$$

でなければならない。よって(14)式に(13)式を代入し、

解析上限周波数 f_{max} は、

$$f_{max} \geq \frac{c}{4\Delta t} \quad (15)$$

となる。本測定では、 $\Delta t = 1\text{m}$ としたので(14)式より $H_{peak} \geq 2$ が干渉効果解析の条件となり、(15)式より 375 Hz 以下で解析が可能である。よってここでは 200Hz 以下で干渉の周期解析を行った。

3.3.4 干渉模様シミュレーション

Fig. 3-6 に干渉効果のモデルとして、水深 $d = 26\text{m}$ 、振幅反射係数 $\mu = 0.5$ 、音速 $c = 1500\text{m/s}$ 、およびスペクトルレベルを全周波数均一 (0 dB) とした条件でスペクトルレベルの水深による変化を (11) 式を用いて求め、1 Hz~200Hz の周波数範囲のスペクトログラムで示した。これより理論上では、音源直下の水中音場には、鉛直方向にわずかずつ位相がずれるため航走時に見られるような干渉模様^{4, 8, 9, 128)}が生じる。この干渉の特徴は、(11)式より周波数が高いほど干渉の周期が短くなって正の干渉の数が増し、水深が深いほどまたは海底に近いほど k の値が大きくなってスペクトルレベルの変動幅が増大する。また海底反射は海面反射¹³⁹⁾と異なり、反射時に位相が反転しないため、海底では全周波数を通して両音波は同位相となり、正の干渉となる。一方、負の干渉は、直接波と反射波の位相差が半周期となる水深に現れる。例えば 100Hz~200Hz の間では、海底から 1.9~3.8m の高さに現われ、50Hz~100Hz の間では、周波数が低下するに従い、海底から 3.8m から 7.5m の高さへと急激に変化する。ただし 15Hz 以下では、音波の周期が水深 (25m) の 1/4 以上となるため、負の干渉は生じない。

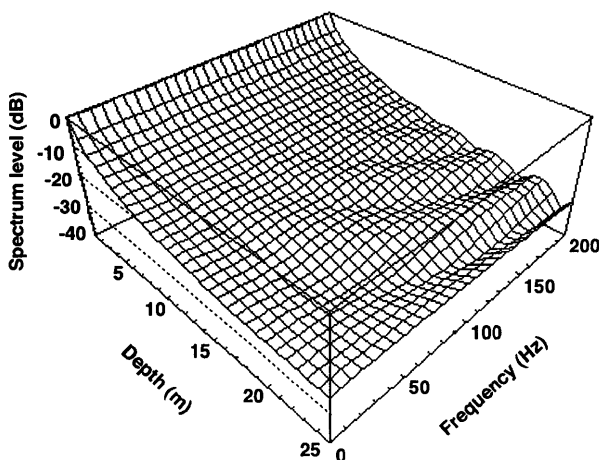


Fig. 3-6 The sound spectrogram of interference of configured by Eq. (11).

All initial spectrum level, 0 dB; $\mu = 0.5$; $d = 25\text{m}$; $c = 1500\text{m/s}$ (0 dB re $1\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

また海面付近では、直接波に比べ海底反射波の伝搬距離が長いので、干渉はほとんど見られない。さらにこの海底付近に見られる干渉は、 $2d-h$ によって決まるため、水深に関係なく、海底から同じ高さに現れる。なお直接波に対する海底海面1回反射波の強さは、海底上 1m ($d-h=1$) のとき -9.8dB となり、直接波に対する海底1回反射波の強さ -0.7dB に比べ十分小さいため、海面および海底での高次反射の影響は無視した。

3.4 結果

3.4.1 停泊船舶から放射される海中放射雑音の特徴

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、Fig. 3-7 に A 点で測定した停船時の供試船から放射される 200Hz 以下の放射雑音のスペクトルレベルを示す。ここでは、各測定条件の主機・原動機回転数の基本周波数の高調波に印を付した。停泊中の供試船の海中放射雑音のスペクトルには主機回転数 600rpm で 10Hz (○), 1,100rpm で 20Hz (●) およびその 1/2 を基本周波数とする高調波が見られた。また原動機を同時に運転した場合、特に主機回転数と原動機回転数との比が約 2 : 3 (1,100rpm : 1,720rpm) となるため、20Hz (●) と 30Hz (□) を基本周波数とする高調波成分が重なり合い、60Hz, 90Hz および 120Hz に強い線スペクトルが現われた。このように停泊船からの放射雑音は、プロペラによる雑音がない場合、船殻を伝わって海中へ放射される船内の主機の振動が主となるた

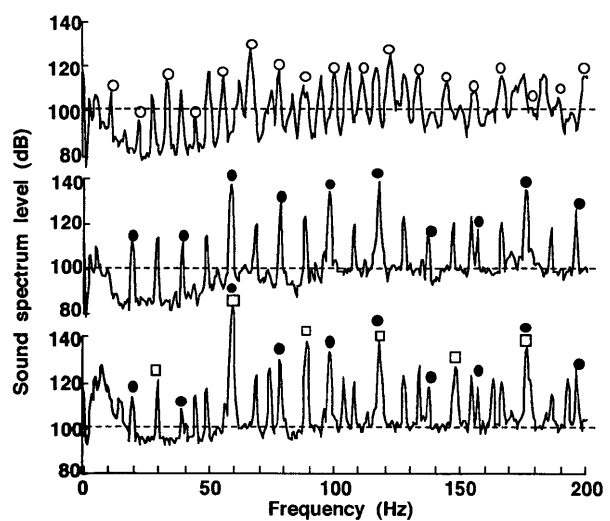


Fig. 3-7 The sound spectrum of underwater noise emitted by drifting vessel at A.

○ (600 rpm), ● (1100 rpm), harmonics (line component spectrum) corresponding with main engine revolution; □ (1720 rpm), with dynamo revolution (0 dB re $1\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

め、その回転数を基本周波数とする高調波が線スペクトルとして現われる。

Fig. 3-8 に B, C 点で測定した船舶放射雑音を、横軸に周波数、縦軸にハイドロホン深さとしたスペクトログラムで示す。また上段には、B 点におけるハイドロホン深さ 3m のスペクトルレベルを示す。なおスペクトルレベルは、濃い方から 80dB 未満, 80dB 以上 90dB 未満, 90dB 以上 100dB 未満, 100dB 以上 110dB 未満, 110dB 以上 120dB 未満および 120dB 以上の 6 階調の濃淡で表示した。解析範囲は、異なる水深における干渉周期を比較するために、両者とも海底から 23m の範囲 (B 点: 水深 3~26m, C 点: 水深 70~93m) とした。これより 200Hz 以下の周波数帯では、主機および原動機に起因する線スペクトル成分が、両水深とも海底まで達していることがわかる。また B 点では、明確ではないが海底付近に周波数の上昇に伴って増加する干渉模様が認められる。

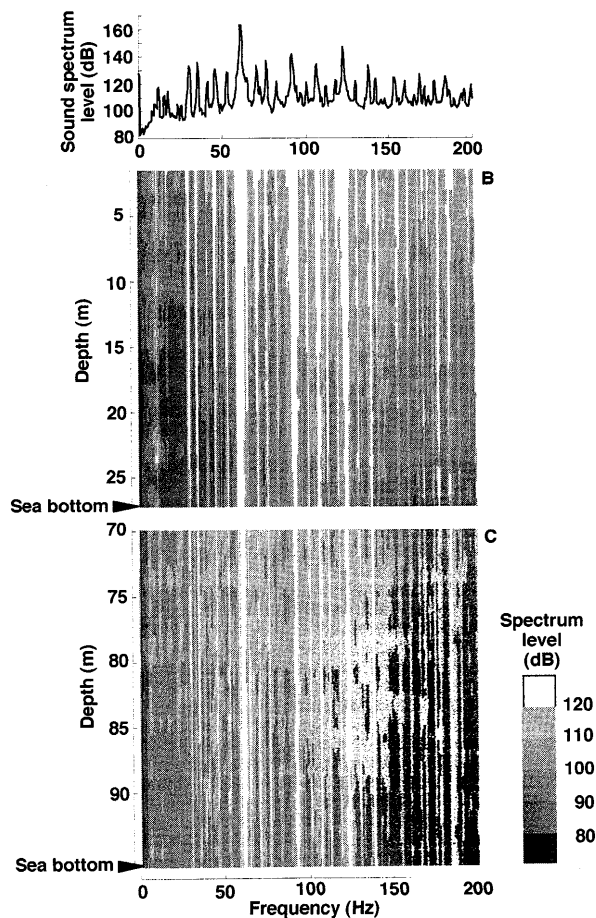


Fig. 3-8 The sound spectrograms of vertical variation in underwater noise emitted by drifting vessel. Top, sound spectrum level at B in a depth of 3 m (0 dB re $1 \mu \text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

3.4.2 海中放射雑音の鉛直特性

停泊する船舶直下では、Fig. 3-8 に示すように主機および原動機に起因する線スペクトル成分が海底まで達しているため、周波数によってバイアスが異なり、そのままではスペクトログラムから干渉模様を得ることは難しい。そこで、各周波数のスペクトルレベルにハイドロホン深さによる球面拡散減衰量 $20 \text{Log} h$ を加えたものから、バイアス成分を除去し、干渉成分のみを抽出した。その結果を Fig. 3-9 に示す。なお吸収減衰は、Thorp¹⁴⁰⁾ の式より 2kHz 以下では $1.3 \times 10^{-4} \text{dB/m}$ となるため無視した。スペクトルレベルは、濃い方から -2dB 未満, -2dB 以上 -1dB 未満, -1dB 以上 0dB 未満, 0dB 以上 1dB 未満, 1dB 以上 2dB 未満および 2dB 以上の 6 階調で示した。これより B 点では海底から約 16m (水深 10m) 以深、周波数 50Hz 以上の範囲に、また C 点でも海底から約 13m (水深 80m) 以深、周波数 50Hz 以上の範囲にスペクトルレベルの強弱による縞模様が認められた。これらは Fig. 2-8 の干渉模様とほぼ一致することから、浅海域における停泊中の船舶から海中に放射される雑音は、海底上方付近で干渉現象が生じることが確認

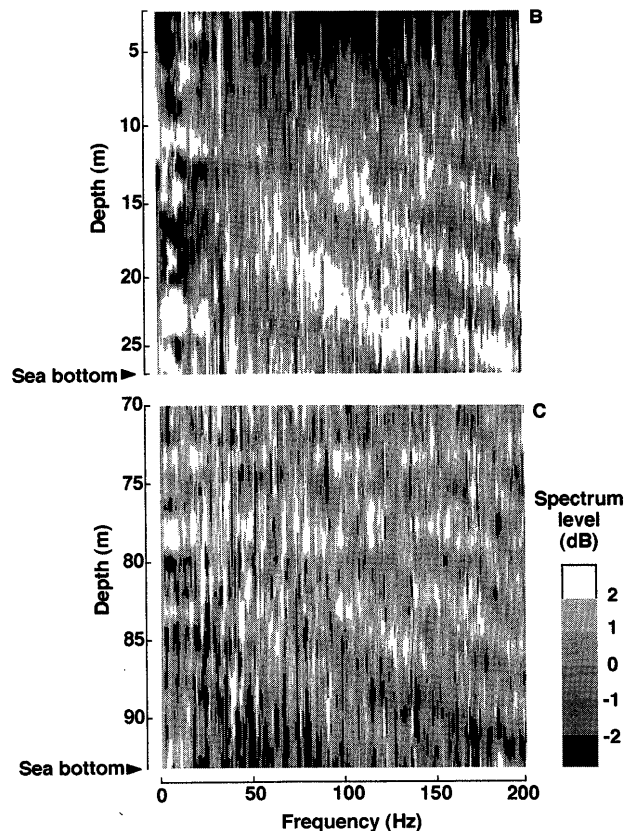


Fig. 3-9 Interference pattern eliminated bias and spreading loss from the spectrogram in Fig. 3-8 (0 dB re $1 \mu \text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

された。ただしC点のように水深が深い場合、その模様は不鮮明となる。

3.4.3 干渉模様の抽出

そこで次に、測定されたスペクトルデータから、水深軸方向に見られる干渉模様のピーク数を抽出した。この方法を以下に説明する。

まず水深軸方向のスペクトルデータ D と干渉のピーク間の長さ ΔH_{peak} から任意の周波数 f におけるピーク数 n は、

$$n = \left[\frac{D}{\Delta H_{peak}} \right] + 1 \left[\frac{2Df}{c} \right] + 1 \quad (16)$$

と表わされる。ただし、 $[\chi]$ はガウス記号で、 χ を超えない整数を示す。これより干渉のピーク数はその海域の水深と周波数によって決まり、ピーク数が n 個となる周波数 f の範囲は(16)式より、

$$\frac{c(n-1)}{2D} \leq f < \frac{cn}{2D} \quad (17)$$

となる。

次に干渉模様のピーク数の抽出の流れを Fig. 3-10 に示す。まず各周波数におけるバイアスを取り除くため、Fig. 3-8 に用いたデータ (A) に拡散減衰量 $20\text{Log}h$ を加える。次に水深ごとのスペクトルデータ (B) を各周波数ごとのスペクトルデータ (C) に転置し、それぞれを水深軸方向に周波数解析して干渉模様の振動数 (D) を求める。その結果 (D) を (17) 式で求めた周波数の範囲ごとで平均し、干渉のピーク数を求める。以上の方法による B, C 点の解析結果を Fig. 3-11 に示す。なお y 軸 ζ の値は、Fig. 3-9 に示すスペクトルレベルのパワーを示す。これより B 点ではピーク数 5~7 個の 125 Hz~200 Hz の間で、C 点ではピーク数 4~7 個の 93 Hz~200 Hz の間で干渉が生じている。ただし 100 Hz 以下の比較的低い周波数では、 ζ が強いためにピーク数が 3 以下の周期の長い干渉模様の抽出は困難であった。また ζ の値は、明確な模様が現われた水深の浅い B 点の方が水深の深い C 点よりも強くなった。

3.5 考察

このように停泊する船舶から海中に放射される雑音は、海底が反射する境界面であるため、海底附近で直接波と海底反射波が干渉することが認められた。しかし海底は平面ではなく、また反射係数の異なる種々の多重層を構成しているため、その反射機構は海面に比べより複雑となる。Liebermann¹³⁸⁾によると、海底での振幅反射係数 μ は、海底が泥のとき0.2と低く、砂のとき0.5として

いる。よって本測定海域のように海底が砂質の場合は、特に干渉効果が大きく現われると考えてよい。

また Fig. 3-6 に示したようにこの干渉は、周波数が低いほど正、負の干渉の間隔が大きくなり、海底に近いほどスペクトルレベルの変動が大きい。例えば 100 Hz~200 Hz の間では、負の干渉は海底から 1.9~3.8 m の高さに見われ、50 Hz~100 Hz の間では、周波数が低下するに従い、海底から 3.8 m の高さから 7.5 m の高さへと急激に変化する。また海底では、全周波数を通して海底では両音波は同位相となり、正の干渉が生じる。その程度は海底反射係数によるが、この数 dB の鉛直変化は

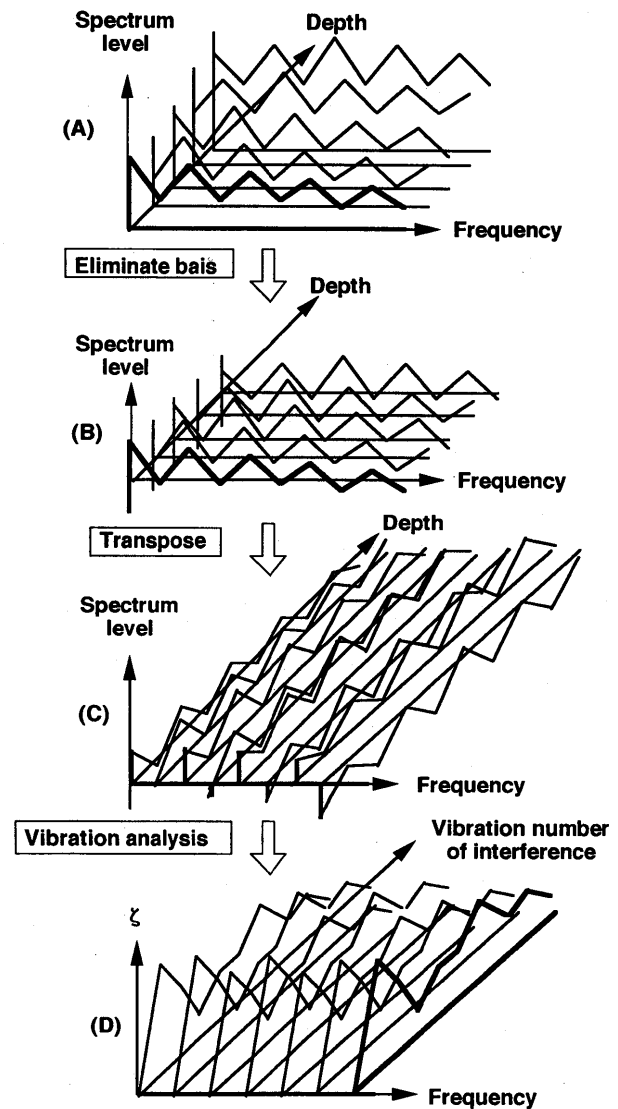


Fig. 3-10 Calculation method of vibration number of interference.

(A), spectrum in Fig. 3-8; (B), spectrum eliminated bias from (A, Fig. 3-9); (C), transposed spectrum; (D), converted data by vibration analysis; ζ , power of spectrum.

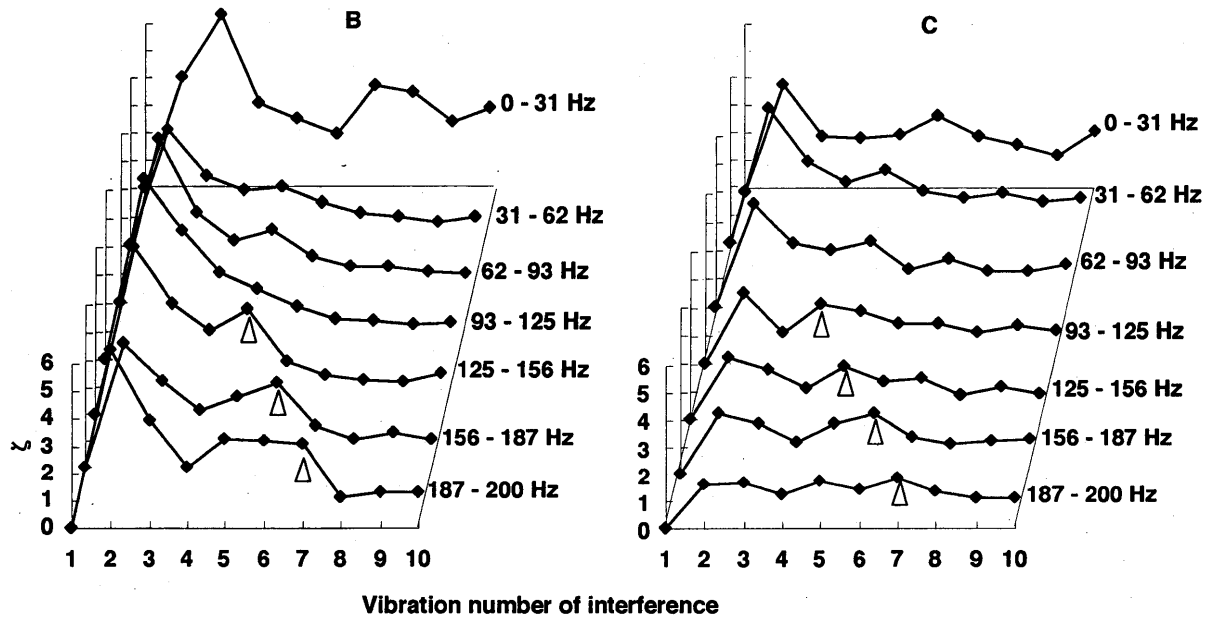


Fig. 3-11 Average vibration number of interference in frequency bands.
 Δ , vibration number of interference obtained by Eq. (16).

鉛直方向にわずかに移動するだけで生じることに注意しなければならない。

第4章 航走船舶から放射される海中雑音

浅海では、海面と海底間の境界面に音波がトラップされ、その間を音波が繰り返し反射しながらある距離を伝搬していく浅海サウンドチャンネルと呼ばれる現象が生じる。ここで言う浅海とは、音響的に海面と海底の両方の境界面が伝搬に影響するという条件を指し、地理的には内海および大陸棚の外辺まで伸びる水深150m以内の沿岸海域に相当する。浅海域において遠方から伝搬してくる海中放射雑音による水中音環境を把握するためには、その雑音背景の音響特性以外にも、この浅海サウンドチャンネル内における音波の伝搬特性を知ることが重要である。

本章では、航走船舶から放射される海中雑音を船舶航走雑音と呼び、浅海域における船舶航走雑音の干渉現象について距離減衰と反射損失を考慮した音線理論を用いてその特徴を説明し、種々の条件で測定された船舶航走雑音から浅海域における周囲雑音の空間的変動について検討した。

4.1 供試船および測定海域

船舶航走雑音の測定は、供試船に Fig. 3-1 に示す鹿児島大学水産学部練習船「南星丸」を、測定船に調査船

「はるか」(1.9トン)を用いた。南星丸は可変ピッチプロペラ船で船速に関係なく主機回転数を一定にすることができるため、船速による音響特性の変化が比較的小なくすることができる。測定は、Fig. 4-1 に示すように鹿児島湾中央部海域西部の平川沖水深約24mのA点(31°27.6' N, 130°32.8' E)、谷山港沖水深約70mのB点(31°28.4' N, 130°34.7' E)、同湾湾奥海域中央部水深135mのC点(31°39.8' N, 130°42.7' E)および中央部水深135mのD点(31°38.9' N, 130°39.1' E)の4点で行った。各測定点は、船舶航走雑音の海底反射の影響を測定するため、海底が平坦で反射係数の大きい砂質の海域を選んだ。

4.2 測定および解析方法

測定は、供試船を Fig. 4-2 の矢印で示すように錨泊した測定船と決められた最接近距離をとり、等深線と平行になる針路で航走させて行った。各測定海域での測定条件を Table 4-1 に示す。測定時の気象は、いずれも快晴、風力階級は0 (calm) で、測定時供試船の周囲1海里以内には航行する他の船舶は認められなかった。

船舶航走雑音に及ぼすハイドロホン深さの影響の測定は、水深24mのA点において5, 10, 15, 20, 24m、水深70mのB点において5, 10, 20, 40, 60, 70mのハイドロホン深さで行った。船速の影響の測定は、C点において測定船との最接近距離を20~40mで航過でき

る針路で直進させて行った。供試船の船速は、主機回転数1,000~1,100rpm, 減速比3.47:1で可変ピッチプロペラの翼角により前進3.4~9.9ノット, 後進2.1ノットの5段階に調整した。最接近距離の影響の測定は、D点において最接近距離を0.01海里, 0.1海里, 0.2海里およ

び0.3海里の4段階とし、ハイドロホン深さは10m, 50m, 100mで測定した。

船舶航走雑音の収録は、第3章のFig.3-3と同じく、錨泊中の測定船の船側からハイドロホンST-1005を海洋観測用自動ウインチを用いて測定水深に垂下して行った。なおデータの記録方法は、第2章と同様とした。収録区間は、Fig.4-2に示すように測定船最接近地点の前後0.5海里とし、測定開始地点を-0.5海里、最接近地点(CPA)を0、測定終了地点を+0.5海里で示す。測定船と供試船の距離測定には供試船のレーダを、最接近距離の測定には測距儀DM-500A(TOPCON)を用いた。

収録した海中放射雑音は、後に信号解析装置により10秒間隔でDC~2kHzの周波数解析を行い、1Hzの帯域幅で1 μ Paを基準値としたスペクトルデータを作成した。なお周波数解析の積算平均処理回数は、すべて10回とした。海中放射雑音の距離変化は、各距離のスペクトルデータを用いてスペクトログラムで示した。

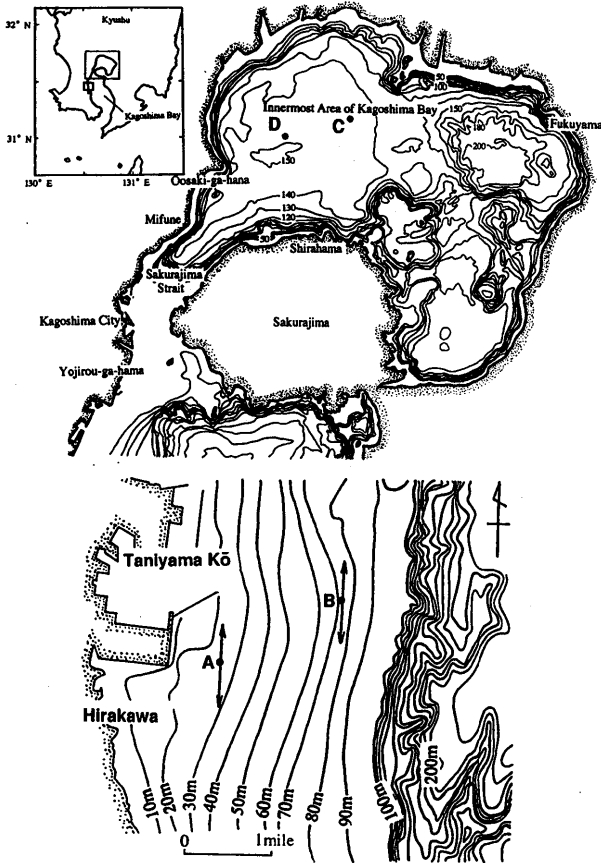


Fig. 4-1 Map of the recording sites (A~D) of underwater noise emitted by cruising vessel "Nansei-maru" in Kagoshima Bay.

A~D, anchor positions of recording boat; arrow lines, course of the cruising vessel "Nansei-maru".

4.3 干渉理論

4.3.1 浅海における水中音伝搬の特性

音源あるいはハイドロホンが浅海の海面近傍にある場合、海面は音波の反射体かつ散乱体であるため、その挙動が水中の音波伝搬に影響を与える。Liebermann¹³⁹⁾によると海面が完全に静穏な場合、海面は完全な音波の反射体となり、反射損失はほとんど0dBに近くなる。Adlington¹⁴¹⁾も、風速5~20kt, 入射補角10~55°の条件における海面反射損失を400Hz~6.4kHz間のすべてのオクターブバンドで実測した結果、その反射損失の中央値は0dBであることを示している。海面が荒れている場合、高周波音の反射損失は0ではなくなるが、低周波音では海面の乱れ(波動)が音波の波長より十分短いため、海面はみかけより静かな状態と見させる。このように海面での反射損失はほとんど無視することのできるた

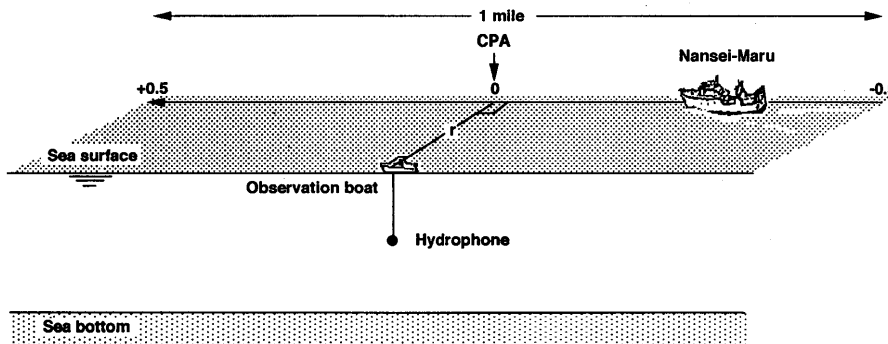


Fig. 4-2 Recording method of underwater noise emitted by cruising vessel "Nansei-Maru". CPA, closest point of approach; r, distance of CPA.

Table 4-1 Recording conditions of the cruising vessel

Recording site	Speed (knot)	Main eng. revolution (rpm)	Propeller pitch angle (deg)	Generator revolution (rpm)	Depth (m)	Hydrophone depth (m)	Closest point of approach (CPA)	
A	Full	9.0	1,100	19	1,720	24	5,10,15,20,24	10m
B	Full	9.0	1,100	19	1,720	70	5,10,20,40,60,70	10m
C	Full	9.9	1,100	19	1,720	135	10	10m
	Half	7.7	1,100	12	1,720	135	10	10m
	Slow	5.3	1,000	7	1,720	135	10	10m
	Dead slow	3.4	1,000	4	1,720	135	10	10m
D	Astem	-2.1	1,000	-7	1,720	135	10	10m
	Full	9.0	1,100	19	1,720	140	10	0.01',0.1'0.2',0.3'
	Full	9.0	1,100	19	1,720	140	50	0.01',0.1'0.2',0.3'
	Full	9.0	1,100	19	1,720	140	100	0.01',0.1'0.2',0.3'

め、海面で反射した音波の強さは入射波の強さにきわめて等しいと考えてよい。ただし海面は、入射媒質より透過媒質の密度が低い境界面のため、反射した音波はスネルの法則により位相が反転する。

一方海底は、海面に類似した多くの特性を持つ境界面である。しかしその機構は、礫から軟泥まで非常に広範囲にわたる複雑な組成を持つ多重層を構成するため、密度や音速が成層によって深さとともに徐々にまた急激に変化する。¹³⁸⁾ Mackenzie¹⁴²⁾ は、海底反射係数が入射補角によって異なることを示した。このような二つの境界面に挟まれた浅海サウンドチャンネル内の音波伝搬について Pedersen¹²⁵⁾ は、鉛直方向に音速変化のない等速水において音線理論値と実測値を比較した結果、遠距離では音速プロファイルの影響による屈折によって干渉パターンは一致しないが、第1シャドゾーンまでの近距離ではよく一致するとしている。よって近距離における浅海サウンドチャンネル内での伝搬経路は、次の4種類に分けることができる。まず音源と受波者が近い場合、音波が直接伝搬する直接伝搬経路が主となり、その伝搬損失は球面拡散減衰と吸収減衰が加わったものとなる。音源が海面または海底付近にある場合、海面反射経路および海底反射経路が存在し、これらの伝搬損失には、球面拡散減衰と吸収減衰に加え、さらに境界面での反射損失を考慮しなければならない。さらに音源と受波者が遠い場合、二つの境界面を繰り返し反射しながら伝搬する多重反射経路が存在し、さらに伝搬経路内での屈折や入射角による海底反射係数の変化を考慮しなければならない。このように浅海では、音源と受波者間に複数の伝搬経路が存在するため、これらが干渉し合い複雑な水中音環境を生む。船舶の航走雑音のような広帯域雑音を無指向性ハイドロホンで受波した場合、この干渉現象は接近に伴いゆ

るやかに低周波数側に移行する音色として可聴でき、これはスペクトログラム上に独特の縞模様^{4, 8, 126, 128)}として現われる。ただしこのような干渉効果は、周波数が2 kHz~3 kHz以下、浅海において音源とハイドロホンとの水平距離が0.1~0.4 海里以下で海面がある程度静穏なときに限られる。Liebermann¹³⁹⁾ は、30 kHz音を用いて海面反射係数を測定した際、海面付近で直接波と反射波が干渉することを示した。McLeroy¹⁴³⁾ は、浅海における低周波音伝搬における反射係数は鏡像音源の配置とその距離によって表されるとした。川上ら¹²⁶⁾ は船舶航走雑音による干渉縞模様をスペクトログラム上で初めて観測し、測定値と3種類の理想的な音道モデルによる計算値とを比較して、伝搬経路の異なる複数の音波が相互に干渉し合うと推定した。Bachman and Kaye¹²⁸⁾ は、水深約42mの海域において船舶航走雑音の実測値と理論値を比較し、伝搬経路数が12の時に両者の干渉模様がほぼ一致するとした。また鄭ら⁴⁾ は、水深の異なる海域において航走雑音を測定した結果、水深により干渉模様が大きく異なることを示した。しかし川上ら¹²⁶⁾ や鄭ら⁴⁾ の報告は、二つの音線の伝搬距離差のみに注目して干渉の特徴を説明しているため、理論値と実測値は一致しない。音波が水平方向に伝搬する場合、実際には同時に複数の音線が干渉していると考えなければならない。前章では、停泊中の船舶直下の海中において、船殻から放射された雑音の直接波と海底反射波が干渉して鉛直方向のスペクトログラムに干渉模様が生じることを報告し、その特徴を海底の反射特性や伝搬経路長による減衰を考慮した音線理論を用いて説明した。McLeroy¹⁴³⁾ によると水中音の伝搬を表現する音線理論は、音源または海面や海底による仮想(鏡像)音源から放射されたすべての音線が音場に貢献する形で表わされる。Fig. 4-3 に浅海

サウンドチャンネル中における鏡像音源の配置を示す。図中の O_{mn} は、海底反射回数を m 、海面反射回数を n として表した鏡像音源を示す。浅海サウンドチャンネル中の海面近くに音源 O 、中層にハイドロホン Q がある場合、まず海底の反射係数を考慮した音源の強さを持つ鏡像音源 O_{10} が海底に置かれる。また海面には、海底反射係数

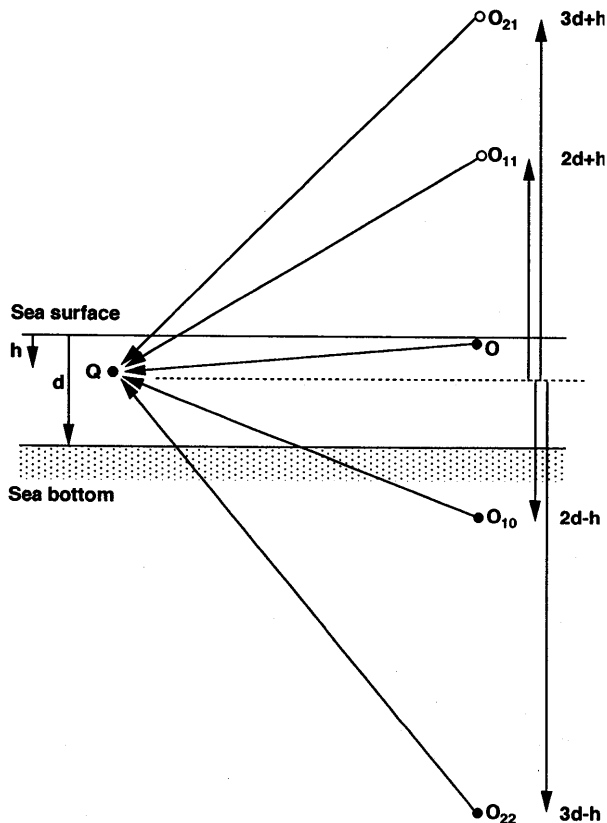


Fig. 4-3 Geometry of the image problem by surface sound source.
 h , hydrophone depth; d , depth of water; Q , hydrophone; O , sound source; O_{mn} , image source; m , reflection number of sea bottom; n , reflection number of sea surface.

および海面反射係数を考慮した音源の強さと海面における位相変化 (180°) を持つ鏡像音源 O_{11} が置かれる。海面における境界条件 (海面上で音圧 0) を満足するにはこれだけでは不十分なので、 O_{10} と O_{11} を補正する意味でそれらの鏡像音源 O_{21} と O_{22} とを追加する。このような鏡像音源の追加を繰り返していくと無限の鏡像音源列が形成されることになる。この理論によれば、受波器と音源との距離が近いほど、直接波と海底・海面反射波の伝搬距離差が大きくなるため、相互の音圧比が増して干渉模様に影響する反射経路数が減少する。しかし両者の距離が遠くなると、直接波と反射波の伝搬距離差が小さくなり、干渉模様に影響する反射経路数が増加する。ただし実際には、高次反射波は繰り返し反射と遠距離伝搬によりその強さが弱められ、ほとんど影響が無くなる。次に伝搬距離による反射経路数を考慮した音線理論を用いて、干渉模様の特徴を得ることとする。

4.3.2 干渉理論

船舶航走雑音は、Fig. 4-4 に示すように音源 O から放射され、直接伝搬経路 l_0 と海底・海面反射経路 l_1, l_2, l_3 等の複数の経路を経てハイドロホン Q で受波される。よって直接波は複数の反射波によって干渉を受けることになる。ここでは 3.3.1 を参考に、各伝搬経路の距離による減衰量を考慮した音線理論から船舶航走雑音の干渉効果の理論式を導いた。

ハイドロホン Q における直接波および海底・海面反射波 (以下、反射波という) のそれぞれの瞬時音圧 p_i は、(2) 式を参考に海底及び海面での総反射回数を i とすると、

$$p_i = k_r P_0 \sin(\omega(t + \tau_i)) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

と示される。ただし、 $i = 0$ は直接波を示し、 $i = 1$ は海底 1 回反射とする。ここに P_0 はハイドロホンにおける

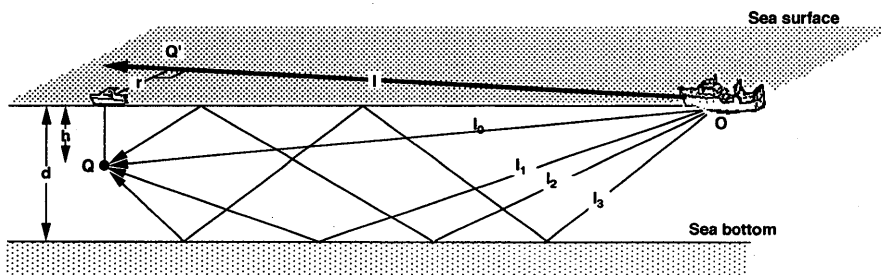


Fig. 4-4 Direct and reflected rays of underwater noise emitted by cruising vessel.

O , sound source (cruising vessel); Q , hydrophone; Q' , CPA to recording boat; r , distance of CPA; d , depth; h , hydrophone depth; l , course line and distance from cruising vessel to CPA; l_0 , direct ray; $l_1 \sim l_3$, reflected rays.

直接波の音圧振幅, k_i は海面反射時の位相反転および海底面の振幅反射係数, 直接波の音の強さに対する反射波の音の強さの比の三者の積, t は時間, ω は角周波数, および τ_i はハイドロホンにおける直接波に対する反射波の遅延時間である。この遅延時間 τ_i は, 伝搬距離差 $l_i - l_0$ を音速 c で割ったものであるから,

$$\tau_i = \frac{l_i - l_0}{c} \quad (19)$$

となる。また i 回反射波の伝搬距離 l_i は,

$$l_i^2 = l^2 + r^2 + \left(\left(i + \left(\frac{1 - (-1)^i}{2} \right) \right) d + (-1)^i h \right)^2 \quad (20)$$

となる。ただし, ここでは音道の屈折は考えていない。ここに l は音源 O から最接近地点 Q' の距離, d は音源から海底までの深さ, h は音源からハイドロホンまでの深さ, r は最接近距離である。

直接波と i 個の反射波が干渉したときの音圧 p は,

$$p = \sum_{i=0}^n P_i \quad (21)$$

となる。(5) 式より平均の音の強さ I は, 一定時間 T 当りの音圧 2 乗平均値であるから, (5) 式に (18), (21) 式を代入し,

$$\begin{aligned} I &= \frac{\left(\sum_{i=0}^n P_i \right)^2}{pc} = \frac{1}{pc} \cdot \frac{1}{T} \\ &\int_0^T \left(\sum_{i=0}^n k_i P_0 \sin(\omega(t + \tau_i)) \right)^2 dt \quad (22) \\ &= \frac{P^2}{pc} \left(\frac{1}{2} \sum_{i=0}^n k_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{i-1} k_i k_j \cos(\omega(t + \tau_i)) \right) \end{aligned}$$

が得られる。また I_0 を音源から 1m 離れた直接波の音の強さ I_0' と直接波の伝搬距離 l_0 で表わすと,

$$I_0 = \frac{I_0'}{l_0^2} \quad (23)$$

となる。よって直接波と i 個の反射波が干渉したときのハイドロホンでの音の強さ I/I_0 は, (7), (22), (23) 式より,

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_0} &= \left(\frac{1}{2} \sum_{i=0}^n k_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{i-1} k_i k_j \right. \\ &\left. \cos(\omega(\tau_i - \tau_j)) \right) \cdot \frac{1}{l_0^2} \quad (24) \end{aligned}$$

となる。また k_i は, 海面反射時の位相反転¹³⁹⁾, 海底反射係数 μ ¹³⁸⁾ および球面拡散減衰による直接波の音の強さ I_0 に対する反射波の音の強さ I_i の比の三者の積であるから,

$$\begin{aligned} k_i &= (-1)^{(i-\alpha)} \mu^\alpha \frac{I_i}{I_0} = (-1)^{(i-\alpha)} \mu^\alpha \frac{\frac{P_0}{4\pi l_i^2}}{\frac{P_0}{4\pi l_0^2}} \quad (25) \\ &= (-1)^{(i-\alpha)} \mu^\alpha \left(\frac{l_0}{l_i} \right)^2 \end{aligned}$$

となる。ただし $i=0$ は, 直接なみのため $k_0=1$ ここに α は海底反射回数であり, 海面反射回数は $i-\alpha$ となり, -1 は海面反射時の位相反転を示す。

よって直接波と i 個の反射波が干渉したときの音の強さのレベル I_{IF} (dB) は, (19), (24) 式および $\omega = 2\pi f$ より,

$$\begin{aligned} I &= 10 \text{Log} \left(\frac{1}{2} \sum_{i=0}^n k_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{i-1} k_i k_j \right. \\ &\left. \cos \left(2\pi f \left(\frac{l_i - l_j}{c} \right) \right) \right) - 20 \text{Log} l_0 \quad (26) \end{aligned}$$

と表わすことができる。ここに f は音波の周波数である。

4.3.3 干渉特性

Bachman and Kaye¹²⁸⁾ は, 水深約 42m の海域において干渉効果の実測値と理論値と比較し, 距離 200m 以上, 周波数 600Hz 以上で伝搬経路数が 12 の時に両者がほぼ一致するとした。干渉模様は, 鉛直方向に音速変化がないと考えた場合, (26) 式より伝搬距離差 $l_i - l_j$ と k の値によって決まる。また干渉模様は, 伝搬距離や海底反射係数⁹⁾ に影響される k_i によって異なる。Fig. 4-5 に水深 $d=24$ m, ハイドロホン深さ $h=15$ m, 海底反射係数 $\mu=0.5$ の条件のもとで, 一様な周波数特性をもつ雑音源がハイドロホンから 0.05 海里および 0.5 海里離れた距離にある時のスペクトルパターンを示す。なお, Fig. 4-4 の 11, 12 のように海底反射後受波される伝搬経路と海面反射後受波される伝搬経路では, 位相が逆転するだけで μ は同値のため, 両者の音の強さには大きな差は生じない。したがってここでは海底反射回数の等しい 2 つの伝搬経路を組として考えていく。図より $\mu=0.5$ の海域では, 音源と受波点の距離 l が 0.5 海里のとき, スペクトルパターンは海底 3 回反射 ($i=6$) 以上の伝搬経路の影響を受けない。また 0.05 海里では, 海底 1 回反射 ($i=2$) でスペクトルパターンが決まる。停泊船の放射雑音の場合, 干渉模様は直接波と海底反射波の伝搬距離差が小さい海底付近で顕著であったが,⁷⁾ 船舶航走雑音の場合, 直接波と反射波の伝搬距離差が小さくなる遠距離ほど, 受波した波形に影響を及ぼす伝搬経路数は増加する。また水深が深いほど位相変化の周期が短くなるため, 干渉模様が不鮮明となる。

一方、干渉模様は鮮明度は、(25)式より海底の底質、すなわち海底反射係数 μ に影響される。Fig.4-6に伝搬経路数を海底反射回数3 ($i=6$)とした場合、海底反射係数 $\mu=0.2, 0.3, 0.5$ のスペクトルパターンを示す。Liebermann¹³⁸⁾が示した $\mu=0.41\sim 0.85$ となる砂の場合 ($\mu=0.5$)、干渉模様は鮮明となるが、 $\mu=0.21\sim 0.50$ の砂泥質 ($\mu=0.3$) や $\mu=0.16\sim 0.17$ の泥質の場合 ($\mu=0.2$)、反射波の強さが低くなるため干渉模様不鮮明となる。ただし海底の反射条件は、吸収の影響を考慮しない場合、臨界角 (critical angle) が存在し、入射角が臨界角より小さいときに全反射 (損失0) が生じる。しかし実際は、すべての海底物質は吸収性であり、Mackenzie¹⁴²⁾が求めたように明確な臨界角は生じず、入射補角の増大により反射係数は変化する。よって k は、伝搬距離だけでなく反射波の入射角に影響される μ によって変化すると考えなければならない。ただしこれらは音速プロファイルが水深によって変化しないことが前提となっている。

4.3.4 干渉模様シミュレーション

Fig.4-7は、(26)式を用いて水深25m、ハイドロホン深さ10m、0~0.5海里の範囲における干渉レベルの

変化をスペクトログラムで示した。上図は、300Hzのスペクトル成分の距離変化を示す。これより干渉値の最小は、受波者から0.17海里の位置で現れ、この最小値はスペクトログラム上に強い縞模様を形成する原因であり、周波数が増すほど遠距離で生じる。また Fig.4-8は、300Hzのスペクトル成分の0~0.5海里間における干渉レベルの最大値と最小値の深度変化を示す。これよりハ

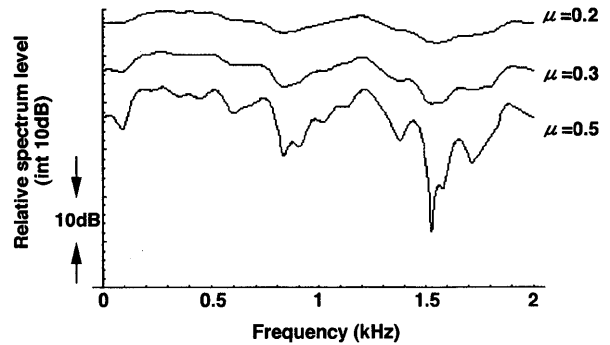


Fig. 4-6 Comparison of spectrum level calculated by Eq. (26) for the amplitude reflection coefficient of sea bottom (μ).

Initial spectrum level, 150 dB (0 dB re $1 \mu \text{ Pa}/\text{H} z^{1/2}$); $f=300 \text{ Hz}$; $i=6$; $d=24\text{m}$; $h=20\text{m}$; $r=10\text{m}$; $c=1500\text{m/s}$.

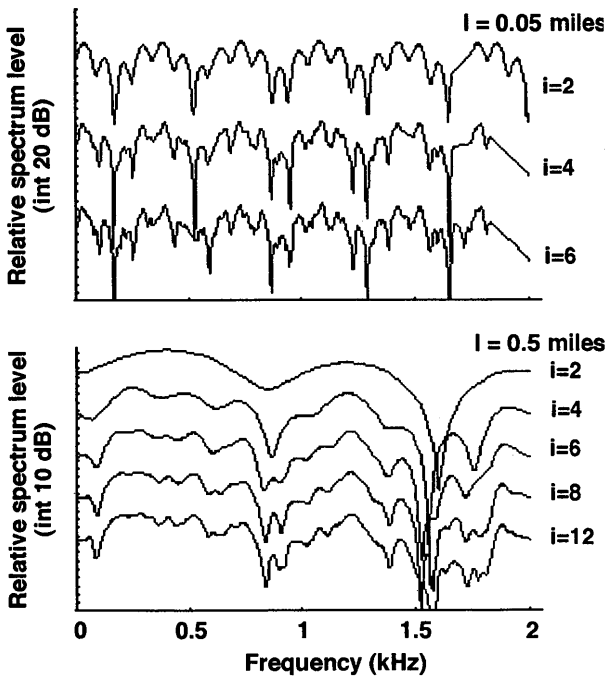


Fig. 4-5 Comparison of spectrum pattern by number of transmission ray at long and short range calculated by Eq. (26).

l , range from cruising vessel to CPA; i , total reflection number; $d=24 \text{ m}$; $h=15 \text{ m}$; $\mu=0.5$ (0 dB re $1 \mu \text{ Pa}/\text{H} z^{1/2}$).

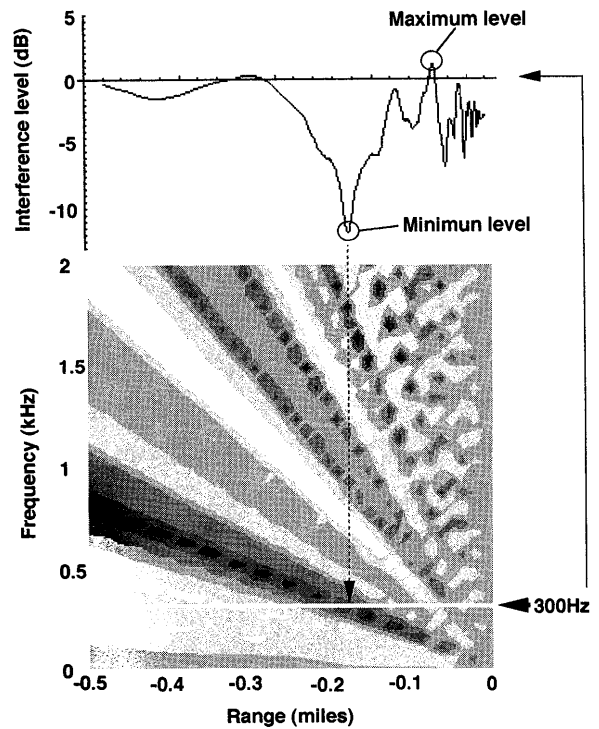


Fig. 4-7 The sound spectrogram of interference configured by Eq. (26) at hydrophone depth (h) 10 m.

Top, variation of interference level in 300 Hz; $i=6$; $r=0 \text{ m}$; $c=1500 \text{ m/s}$; $\mu=0.3$.

イドロホン深さが増すにつれて最大値と最小値の差が大きくなり、中層では最大値よりも最小値の絶対値が大きくなった。また海底反射係数 $\mu=0.3$ とした場合、表層では両値とも -3dB であった。これは海面で反射波の位相が逆転し、直接波と海面反射波が負の干渉を生じるためである。¹⁴⁾ さらに海底では海面と同じく最小値が -3dB となったが、最大値は海底反射波による正の干渉の

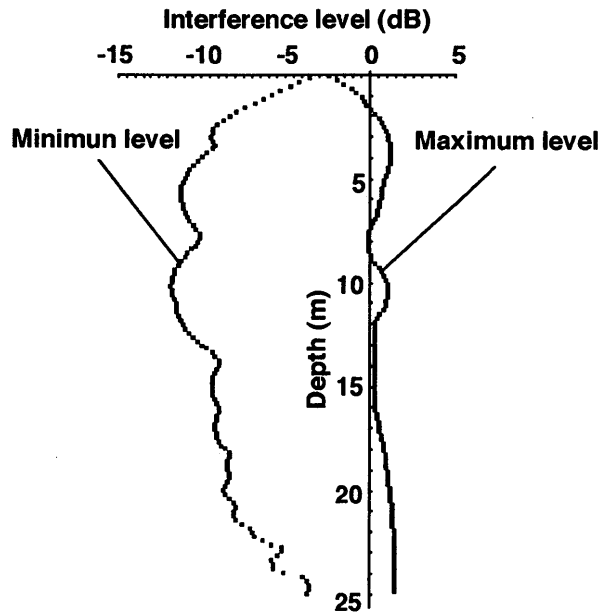


Fig. 4-8 Perpendicular variation of maximum and minimum interference level with Eq. (26).
 $f=300\text{ Hz}$; $i=6$; $d=25\text{ m}$; $r=0\text{ m}$; $c=1500\text{ m/s}$;
 $\mu=0.3$.

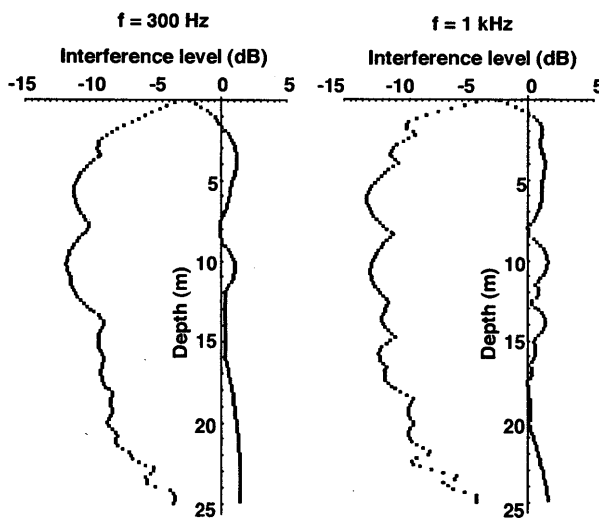


Fig. 4-9 Comparison of perpendicular variations of maximum and minimum interference level with Eq. (26) by frequency (f).
 $d=25\text{ m}$; $i=6$; $r=0\text{ m}$; $c=1500\text{ m/s}$; $\mu=0.3$.

ため大きくなっている。また(26)式を用いて求めた周波数が異なる場合(300Hz, 1kHz)の0~0.5海里の範囲における干渉レベルの最大値と最小値の深度変化をFig.4-9に示す。両者には特に大きな差はないが、海面直下にある負の干渉値は、低周波音ほど深くまで現れる。

Fig.4-10は、(26)式を用いて求めた伝搬経路数 $i=6$ (海底反射回数3)、水深24mおよび70m、海底反射係数 $\mu=0.5$ の海域における干渉模様を示す。なお計算の条件は、音速 $c=1,500\text{ m/s}$ 、最接近距離 $r=10\text{ m}$ 、音源の放射雑音スペクトルレベル I_0 を全周波数一定(150dB)とした。また水深 d およびハイドロホン深さ h はA、B点の測定と同じく、 $d=24$ では $h=5, 10, 15, 20, 24\text{ m}$ 、 $d=70$ では $h=5, 10, 20, 40, 60, 70\text{ m}$ とした。これより干渉模様は、同一水深の海域でもハイドロホン深さによって大きく異なった。また水深70mのB点では、A点に比べ干渉模様が密となり、模様が不鮮明となった。この原因は、水深が深くなると反射波の伝搬距離が大きくなり、移動距離に対する位相変化が激しくなるためである。

4.4 結果

4.4.1 航走船舶から放射される海中雑音の特徴

浅海において航走する船舶から放射される海中雑音の特徴をFig.4-11に示す。測定は、A点(水深24m)、ハイドロホン深さ5mで行った。20Hz~200Hz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ある。また100Hz~400Hzには連続スペクトル成分(b)が見られ、最接近付近で急激にレベルが増加する。また最接近点への接近に伴い、連続スペクトル成分が低周波側へシフトする傾向(c)が縞模様となって見られる。これはハイドロホ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ことによって干渉が生じるためである。なおその他にも通過に伴ってドップラー現象⁴⁾が生じるが、その変化量は船速9ノット、周波数2kHzで6Hz、また200Hzで0.6Hzと、2kHz以下の周波数ではきわめて小さい。

4.4.2 海中放射雑音に及ぼす諸条件の影響

直接波と反射波による干渉縞模様は、両波の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。以下に海中放射雑音におよぼす水深、ハイドロホン深さ、船速、および最接近距離の影響について述べる。

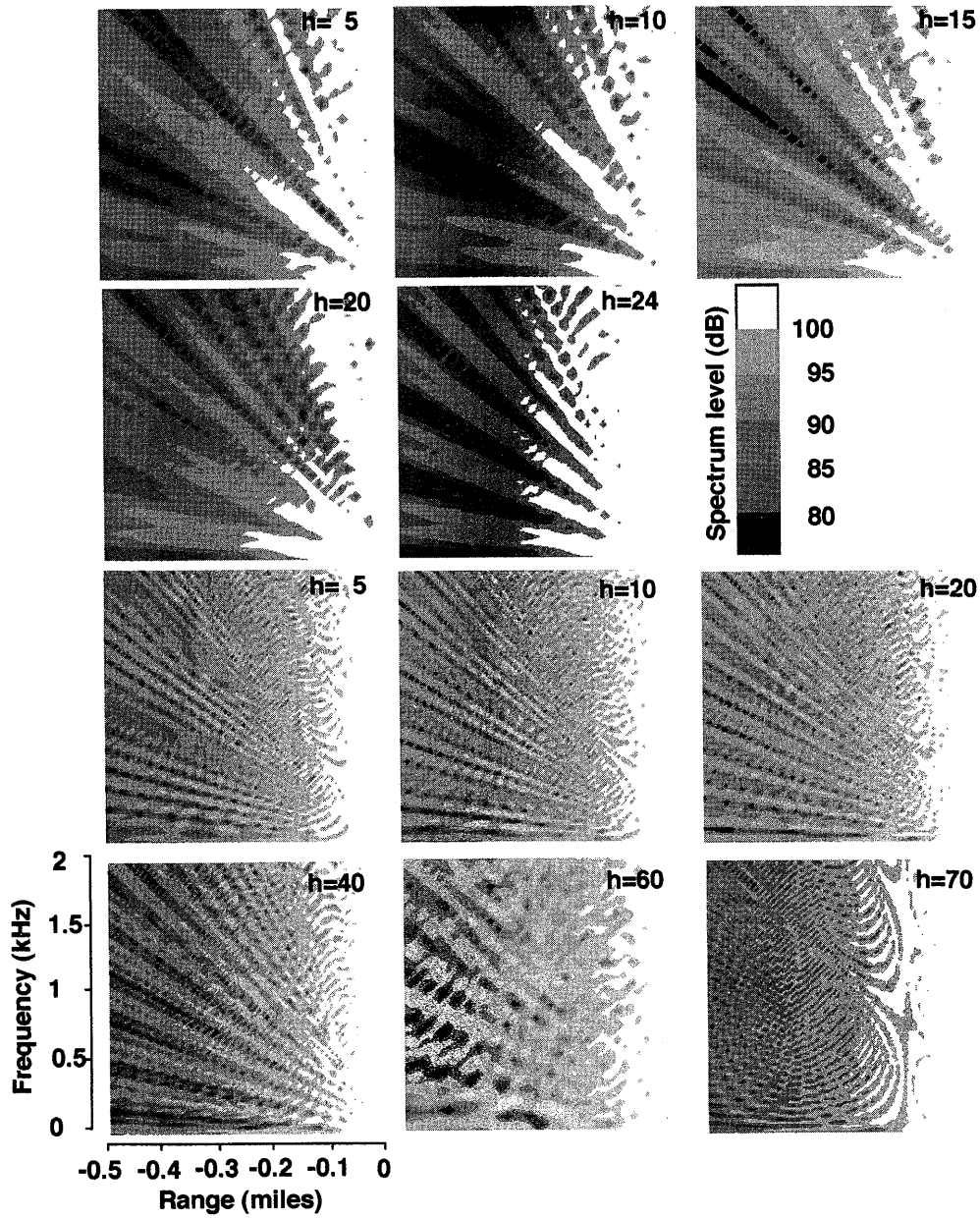


Fig. 4-10 The sound spectrograms of vertical variation configured by Eq. (26).
 Top five figures, $d=24\text{m}$; bottom six figures $d=70\text{m}$; h , hydrophone depth; all initial spectrum level, 150 dB ($0\text{ dB re } 1\ \mu\text{ Pa}/\text{Hz}^{1/2}$); $\mu = 0.3$; $r = 10\text{m}$; $c = 1500\text{m/s}$.

1) 水深

Fig. 4-12に水深の異なるA点 (24m), B点 (70m) およびC点 (135m) で測定されたハイドロホン深さ10 m, 船速9~9.9ノットにおける海中放射雑音の時間変化を, 縦軸に周波数 f , 横軸に測定船と供試船の距離としたスペクトログラムで示す。これより干渉模様は, 水深が135mと深いC点で最も細かくなった。これは水深が深いほど, 海底反射波の接近距離の変化に伴う位相変化の周期が短くなるためである。しかし音圧レベルの変化は, Fig. 4-13に示すように接近に伴い変動しながら上昇するが, 水深による差はなかった。

Fig. 4-14に水深が異なる場合の0~0.5海里の範囲における300Hz音の干渉音圧レベルによる最大値と最小値の深度変化について(26)式を用いて求めた。これより浅海では, 受波者の深度によって大きく異なり, 深さ10 m付近でもっとも負の干渉が大きくなり, 海底に近づくにつれて小さくなった。また水深が深い場合も強い負の干渉が生じるが, 特に海面と海底附近では, 負の干渉が小さくなった。

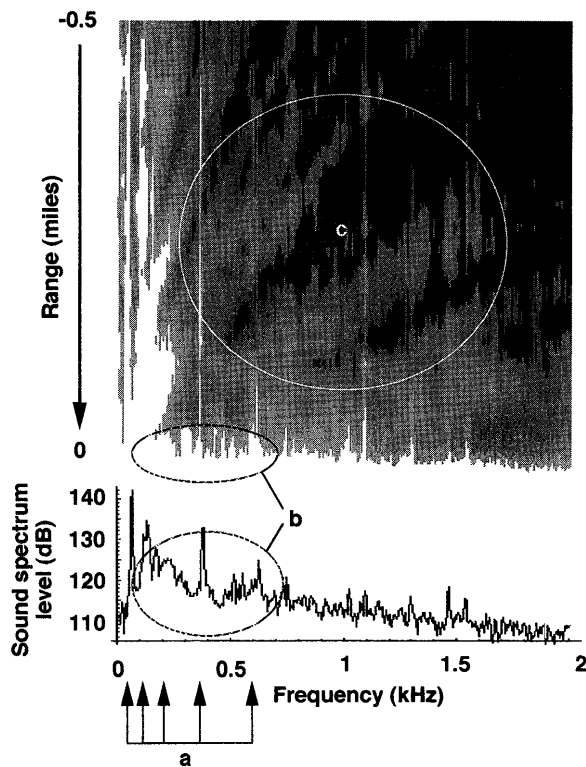


Fig. 4-11 The sound spectrogram of underwater noise emitted by cruising vessel and the sound spectrum at CPA.

a, line components spectrum; b, continuous components spectrum; c, interference (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

2) ハイドロホン深さ

Fig. 4-15にA, B点で測定されたハイドロホン深さが異なる場合の海中放射雑音の時間変化をスペクトログラムで示す。これよりB点のハイドロホン深さ $h=20\text{m}$, 40m および 70m を除いて, 各ハイドロホン深さで異なる干渉模様が現われた。またこれらを Fig. 4-10のシミュレーション結果と比較すると, A点の各水深およびB点の $h=5, 10\text{m}$ ではほぼ一致したが, B点の $h=60\text{m}$ では実測値では比較的鮮明な干渉模様が現われたにもかかわらず, 理論値では模様が不鮮明となった。なお音圧レベルの変化は, Fig. 4-16に示すように接近に伴い変動しながら上昇するが, ハイドロホン深さによる差はなかった。

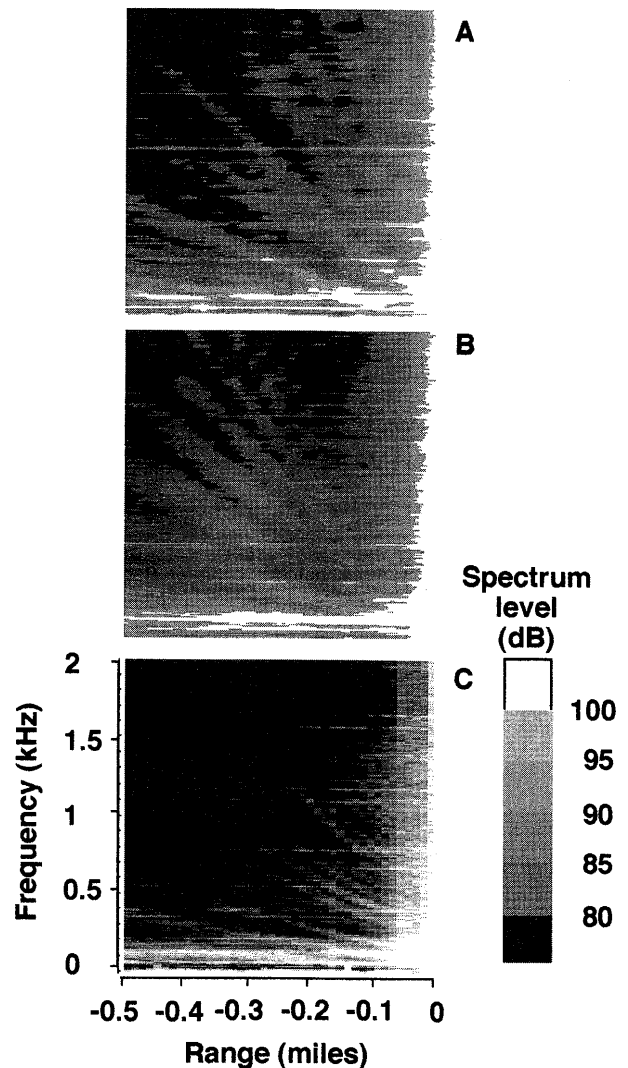


Fig. 4-12 Comparison of sound spectrograms of underwater noise emitted by cruising vessel for water depth at A~C.

$h = 10\text{ m}$; $v = 9\text{ knots}$ (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

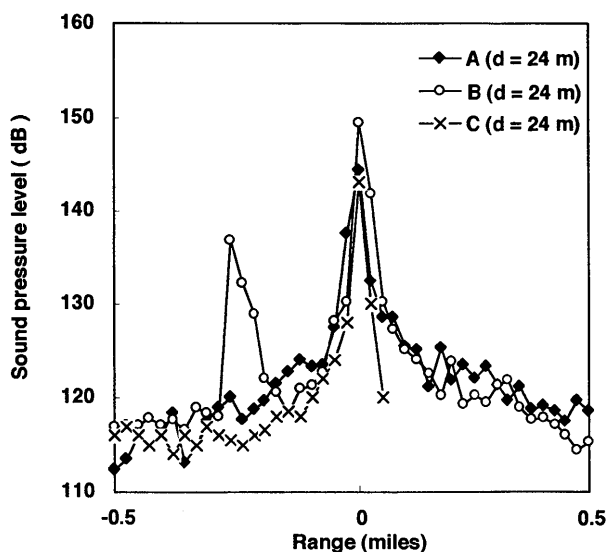


Fig. 4-13 Comparison of sound pressure level variation for water depth at A~C.
 $h=10$ m; $v=9$ knots (0 dB re 1μ Pa).

3) 船速

供試船を主機回転数 1100rpm でプロペラ翼角にて船速を調整して航行させ、供試船と測定船の距離が 50m になった時の 1kHz 以下の海中放射雑音のスペクトルを Fig.4-17 に示す。測定は、水深が深く、海底反射波の影響が低い C 点で行った。また図には、航走時と同じ主機、原動機の回転数の停船時の放射雑音も示した。停船時にも見られた線スペクトル成分は、各船速において主機回転数が一定のため、その周波数は船速にかかわらず同一で、20Hz~200Hz に現われた。一方、full 航走時には 50Hz~200Hz、後進時には 50Hz 以上の周波数帯に強い連続スペクトルが現われた。Urlick¹²¹⁾によると通常 100Hz~1kHz の間に主ピークを持つ連続スペクトルは、プロペラキャビテーションによって発生する雑音であるとしている。これより可変ピッチプロペラ船の場合、線スペクトル成分は船速に関わらず一定であるが、連続スペクトル成分は船速により異なり、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ることがわかった。

Fig.4-18 に C 点で測定された船速が異なる場合の海中放射雑音の時間変化を示す。Fig.4-17 で見られた線スペクトル成分は、全船速のスペクトログラムにおいて 0.5 海里ですでに現われた。また full 航走時には、接近に伴い 50Hz~200Hz の周波数帯に強い連続スペクトルが現われた。また接近に伴う音圧レベルの変化は、Fig.4-19 に示すように主機回転数が一定であるため、船速に関係なく顕著な増加傾向が見られた。可変ピッチプロ

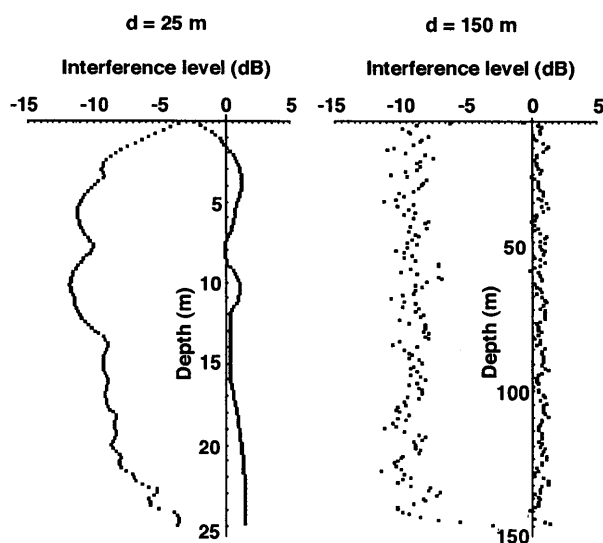


Fig. 4-14 Comparison of perpendicular variations of maximum and minimum interference level with Eq. (26) by water depth (d).
 $f=300$ Hz; $i=6$; $r=0$ m; $c=1500$ m/s; $\mu=0.3$.

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特徴を持つ。

4) 最接近距離

Fig.4-20 に D 点で測定された最接近距離が異なる場合の海中放射雑音の時間変化をスペクトログラムで示す。ここでは C 点に比べ、全体的に干渉模様は明瞭とはならなかった。音圧レベルの変化は、Fig.4-21 に示すように接近に伴い変動しながら上昇するが、ハイドロホン深さによる差はなく、最接近距離が 0.2 海里では約 5 dB の上昇にとどまり、0.3 海里ではほとんど上昇しなかった。ただし Fig.4-20 に示すように 0.2 海里以上離れた地点でも線スペクトル成分は認められた。

Fig.4-22 に最接近距離が異なる場合の 0~0.5 海里の範囲における 300Hz 音の干渉音圧レベルによる最大値と最小値の深度変化について (26) 式を用いて求めた。これより最接近距離が遠いほど干渉の影響が小さくなるが、表層における負の干渉が生じる水深が増し、最接近距離 0.3 海里ではハイドロホン深さ 7m まで球面拡散損失値よりも低い値となった。

4.5 考察

船舶航走雑音の音響特性は、可変ピッチプロペラ船では線スペクトル成分の船速による変化がなく、接近に伴う音圧上昇も距離的には変化がない。しかし固定ピッチプロペラ船は、鄭ら⁴⁾によると低速時、主機回転数を落

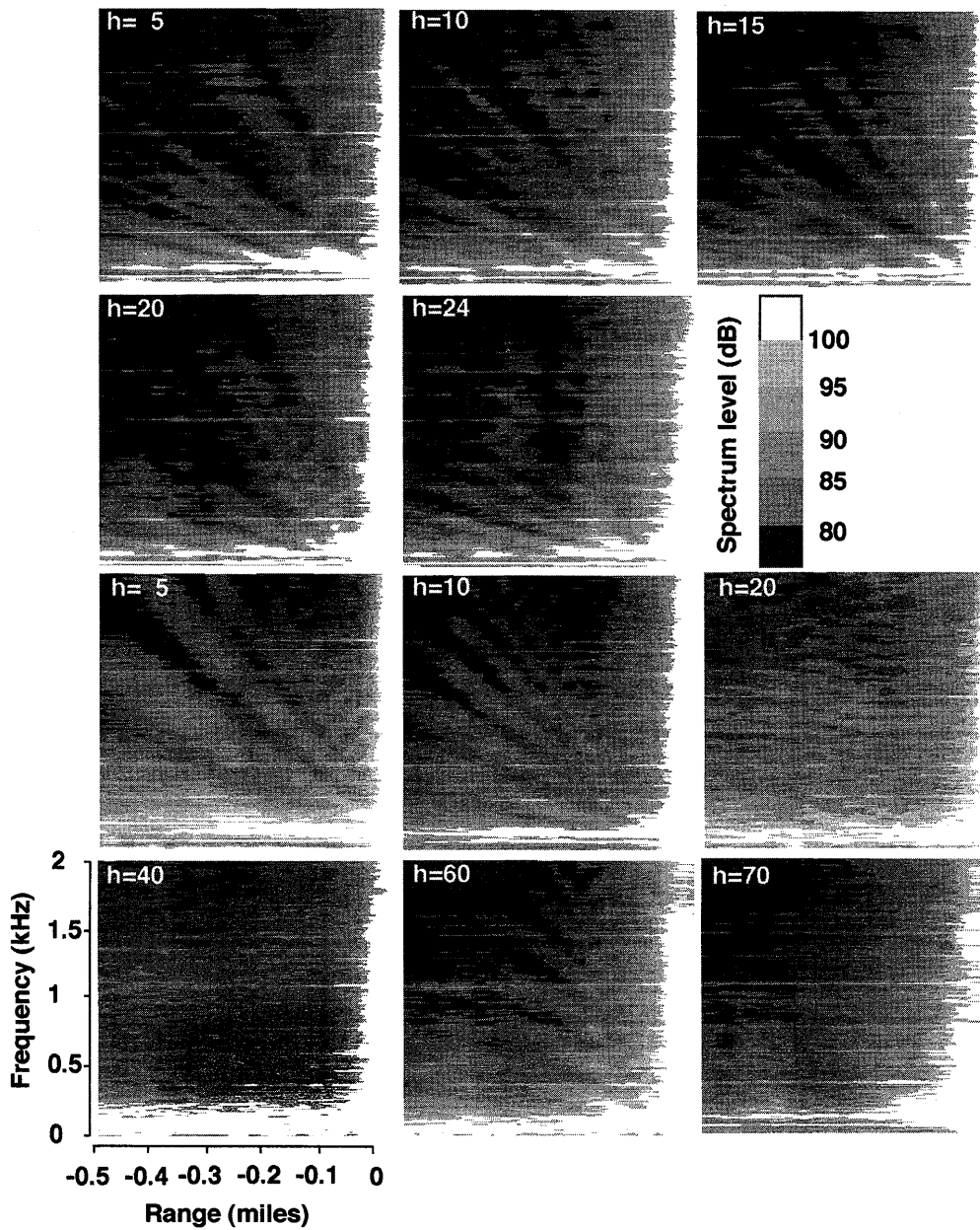


Fig. 4-15 Comparison of sound spectrograms of underwater noise emitted by cruising vessel for hydrophone depth. Top five figures, $d=24$ m (B); bottom six figures, $d=70$ m (C); h , hydrophone depth (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

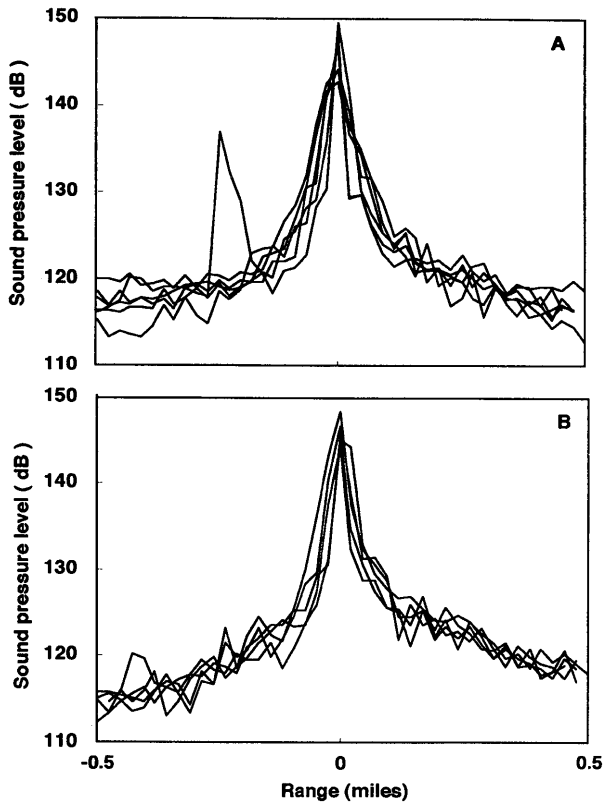


Fig. 4-16 Comparison of variations of sound pressure level by cruising vessel for hydrophone depth at A and B (0 dB re $1 \mu\text{Pa}$).

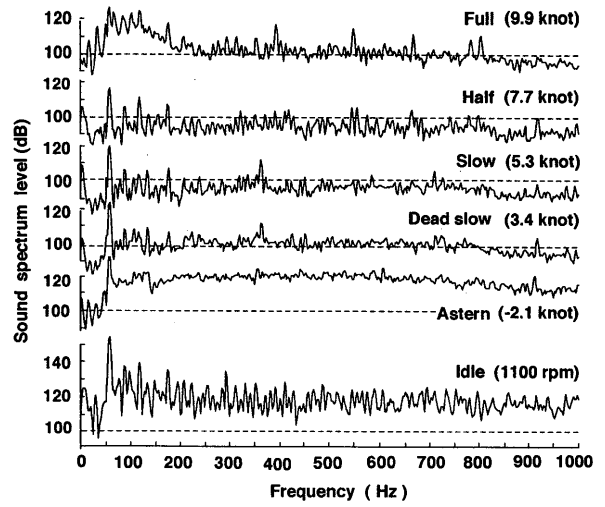


Fig. 4-17 Comparison of the sound spectrum of underwater noise emitted by cruising vessel for cruising speed at C.
 $l=50 \text{ m}$ (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

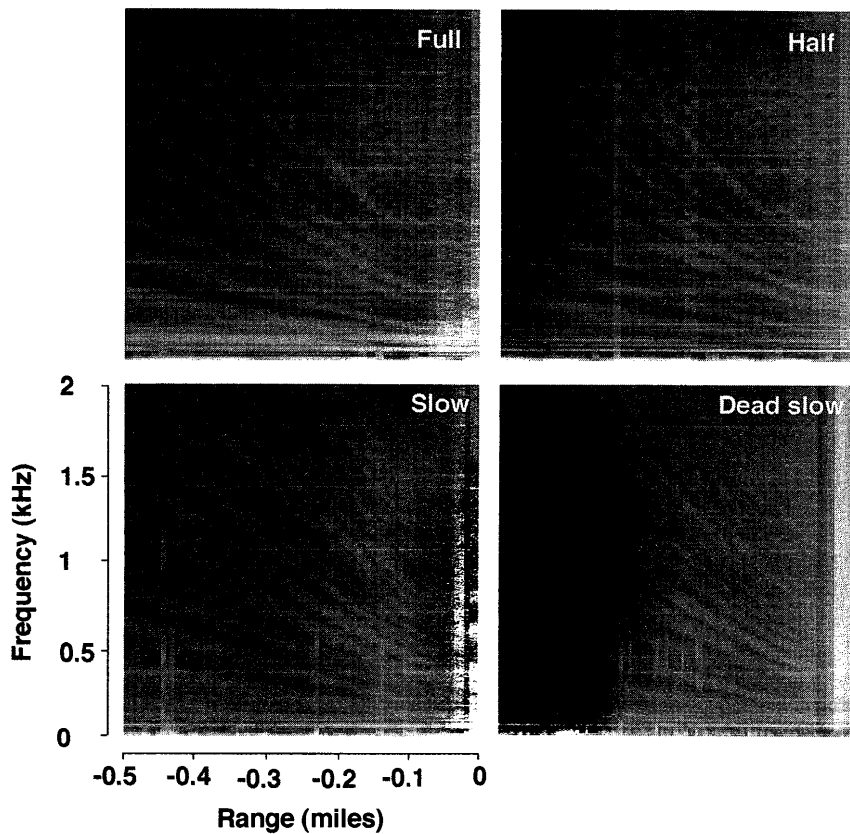


Fig. 4-18 Comparison of sound spectrograms of underwater noise emitted by cruising vessel for speed at C.

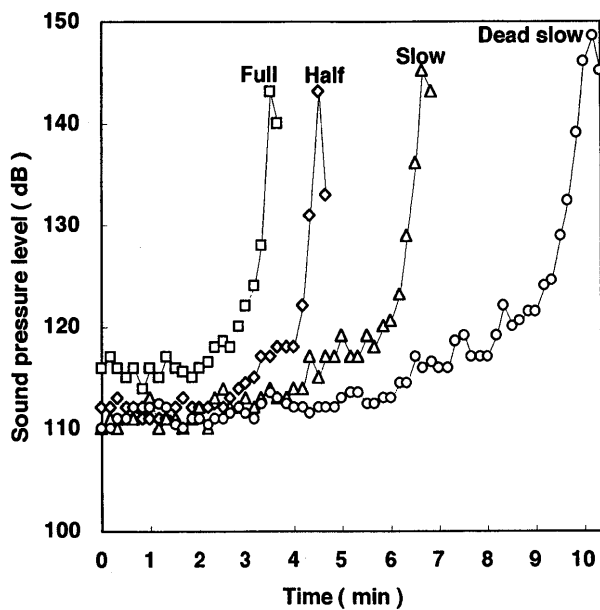


Fig. 4-19 Comparison of variations of sound pressure level by cruising vessel for cruising speed at C (0 dB re $1 \mu\text{Pa}$).

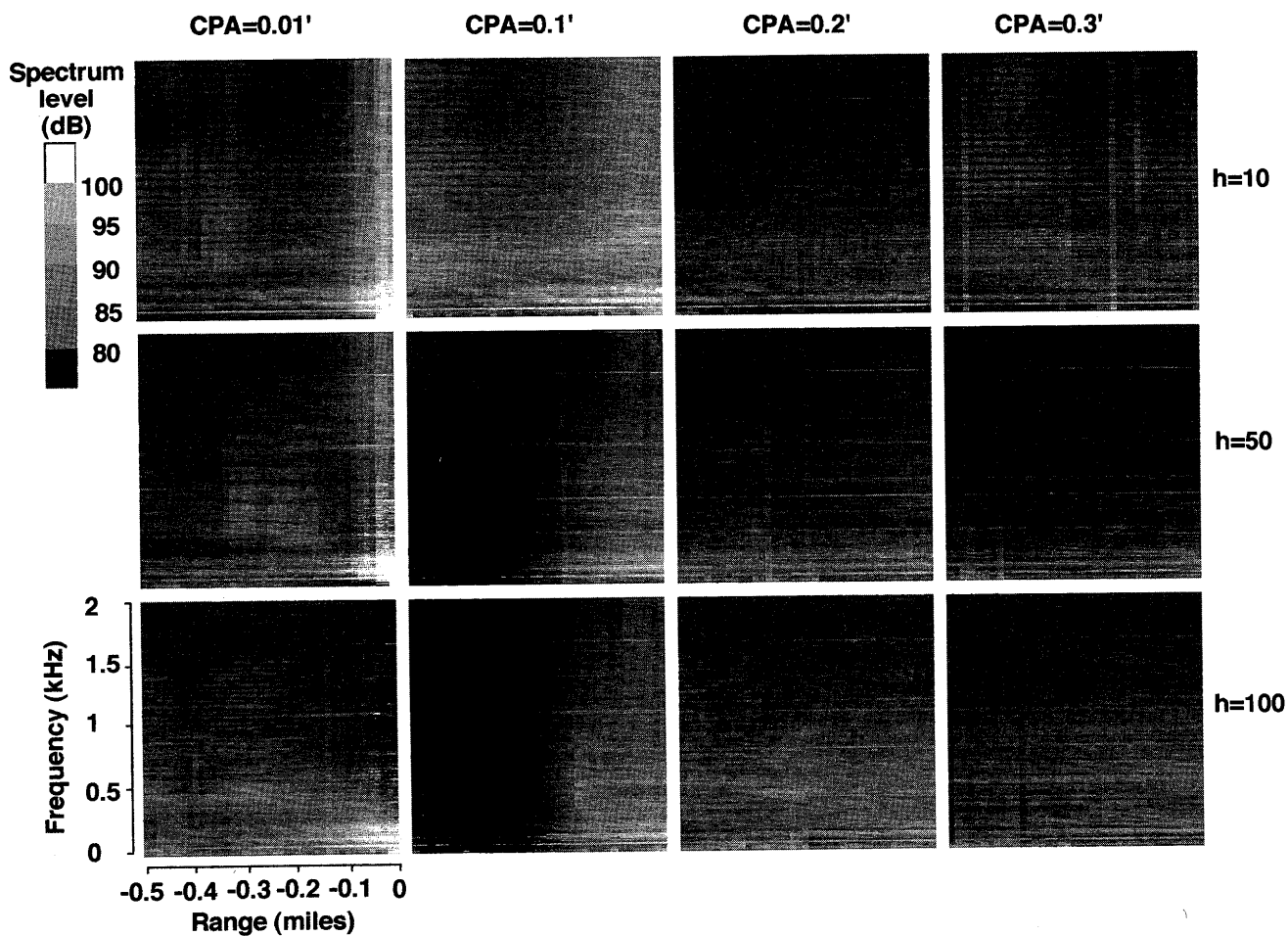


Fig. 4-20 Comparison of sound spectrograms of underwater noise emitted by cruising vessel for CPA at D, h, hydrophone depth (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

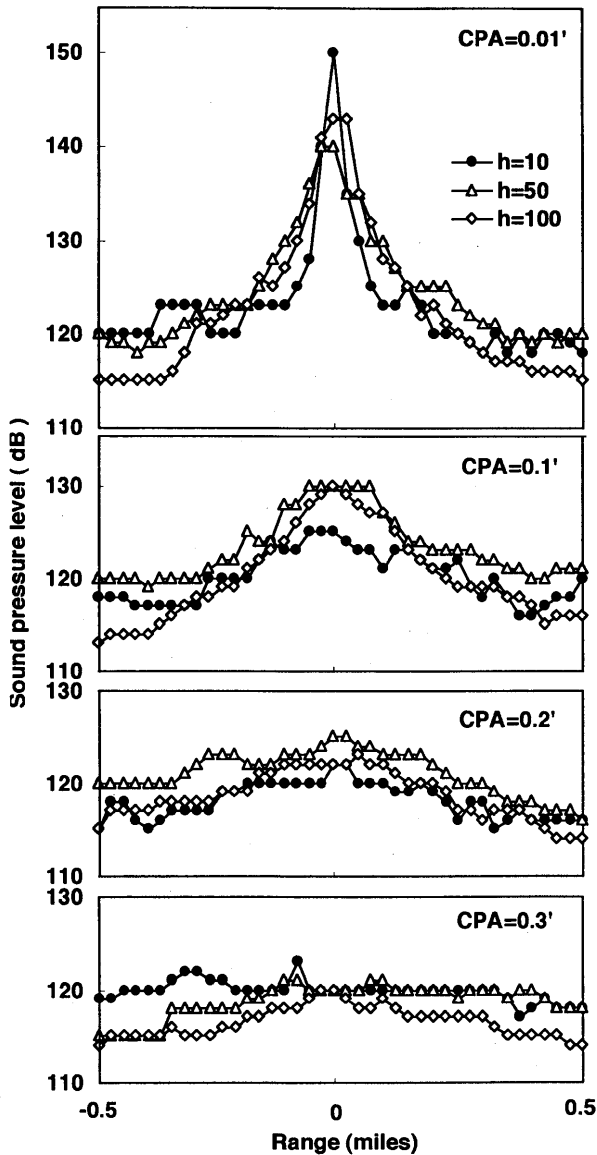


Fig. 4-21 Comparison of sound pressure level variations for CPA at D (0 dB re 1 μ Pa).

とすため音圧レベルの急激な上昇は見られないと報告している。

一方、浅海域において遠方から伝搬してくる音波は、浅海サウンドチャンネルの影響により干渉が生じる。これは海面と海底の境界構造が異なるため、Fig.4-8に示したように干渉の最大値と最小値は鉛直方向に大きく異なった。特に海面では、位相反転した海面反射波の影響により干渉の最大値、最小値とも-3dBとなり、Fig.4-9より周波数が低いほど、Fig.4-22より最接近距離が遠いほど深くまで現れる。ハイドロホンが水面近くにある場合、遠方を航走する船舶からの放射雑音が聴こえないのは、これが原因である。また海底では、位相反転しない海底反射波の影響を受けるため、中層に比べ干渉の最大値は減少せず、最小値が小さくなる。このように両境界面附近では、それらの反射特性の影響を受け、中層とは特に異なった水中音干渉を形成していることがわかる。

さらに海中の音線は、海中の鉛直方向音速分布（音速プロファイル）によって決まり、鉛直方向に音速分布が変化する場合、スネルの法則に従って音線は大きく屈折する。遠距離伝搬では、夏と冬の音速プロファイルが異なるため、伝搬減衰量は大きく異なる。^{143, 145)} 鹿児島湾における水温の季節変化について、最深部の喜入沖を指標とすると、水深100m以深では春から夏にかけて水温躍層が形成され、秋から冬にかけてその水温躍層が消滅して垂直的にはほぼ均一の状態となる。¹³⁸⁾ よって鹿児島湾では、表層水温が上昇する夏季に水温の鉛直勾配が生じ音線の屈折が強くなる。したがって干渉模様は、季節によっても大きく変化すると推察される。おそらく Fig.4-10の水深70mの理論値で不鮮明となった縞模様が Fig.4-15の実測値に現れたのは、この音線の屈折が原因して

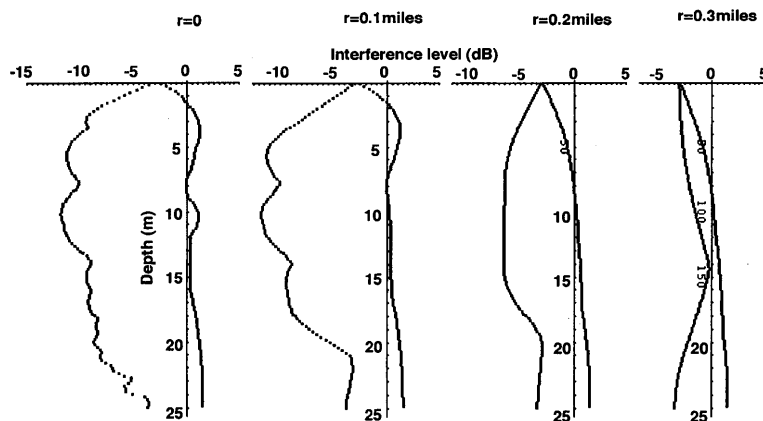


Fig. 4-22 Comparison of perpendicular variations of maximum and minimum interference level with Eq. (26) by CPA (r).
 $f=300$ Hz; $i=6$; $d=25$ m; $c=1500$ m/s; $\mu=0.3$.

いると考えられる。このように海域固有の海洋構造により伝搬特性が大きく異なるため、忠実な海域の音響構造を知るには、反射面である海底面下の構造のみならず海中構造についても正確に把握することが必要になる。

以上のように浅海域において遠方から伝搬してくる海中放射雑音については、音源の音響特性以外にも、底質や水深、音速プロファイルなどの伝搬条件による空間的特徴を捕らえ、かつ音源または受波者の移動に伴う時間的変動を把握しておく必要がある。

第5章 魚群遊泳音

魚の発する音は、魚の内部もしくは外部器官によって発せられる biological sound と、魚の行動に付随して発せられる mechanical noise に区別され、そのうち魚群の遊泳音は後者に属する。¹⁰⁰⁾ これまで魚群遊泳音は、ジャンプや尾で水面をたたき時に発生する低周波の持続時間の短い音であるとされてきたが、^{107, 108)} 最近の報告では、浮魚魚群が発する音は、魚の遊泳行動に伴って発せられる遊泳付随音がほとんどで、その卓越周波数は 1kHz 以下であるとされている。¹⁰⁹⁾ 生簀内の水中音から魚群遊泳音の特徴を求めた研究によると、^{3, 146, 147)} 魚種により卓越周波数が異なった。このような遊泳音の存在や卓越周波数の相違は、竹村¹⁰⁹⁾ によると魚群の遊泳形態、魚体型に起因すると述べている。

魚群内の魚にとっての水中音環境は、海中雑音や海中放射雑音に個々の魚から発せられる遊泳音を含んだものとなる。本章では、養殖生簀内で収録した魚群遊泳音から遊泳音波形を抽出し、ゼロクロッシング法を用いて遊泳音の周期を求め、その特徴について検討した。なおここではハイドロホンによる音圧測定としたため、側線の関与については無視した。

5.1 収録方法

魚群遊泳音の収録は、Fig.5-1 に示す鹿児島湾奥部海域北部の鹿児島県始良郡隼人町沖合い A 点に設置されている城山合産株式会社隼人養殖場海上小割生簀にて行った。また周囲雑音の収録は、養殖場西方 1 海里の B 点 (水深 120m) にて行った。測定時期は、水温が高く魚群遊泳活動が活発な夏期 (1992年 9 月 10 日, 13 日, 18 日, 27 日) に、給餌終了 1 時間後および無給餌日に海面が穏やかで付近に航走船舶や給餌作業船が存在しない時間帯を選んで行った。当養殖場の生簀構造は、発泡スチレン製フロートをつけた 1 辺 15m の丸型鋼管製筏に深さ 7m の角型金属製網を取り付けた角型生簀で、四方を固

定用索によって水深 30~60m の海底に固定されている。収録対象魚種は、マダイ、ブリ、ヒラマサ、カンパチおよびトラフグで、総量、大きさを Table 5-1 に示す。目視観察によると、生簀内の魚群の遊泳状態は、ブリおよびカンパチでは生簀中央に強い渦を発生させるほどの高速旋回遊泳をしていたが、ヒラマサでは前者に比べ体重が 170g と小さく、明確な旋回遊泳は認められなかった。一方マダイは生簀底層を密に遊泳し、トラフグは主に鰭を用いて生簀全体をゆっくり遊泳していた。

収録方法を Fig.5-2 に示す。生簀中央のフロート直下 4m に懸垂したハイドロホン ST1020 で受波した水中音は、船上の水中音圧計に導き、データレコーダに収録した。なおハイドロホンケーブルは、魚の遊泳行動に影響を与えないように水面上とした。また周囲雑音は、フロートの浮力により水深 4m に支持したハイドロホンを用いて収録した。各生簀の水中音および周囲雑音の収録時間は 5 分間とした。音圧は全て $1 \mu\text{Pa}$ を基準とした音圧レベルに換算した値で表示した。なお交流電源雑音を防止するため、測定機器にはすべて直流電源を用いた。

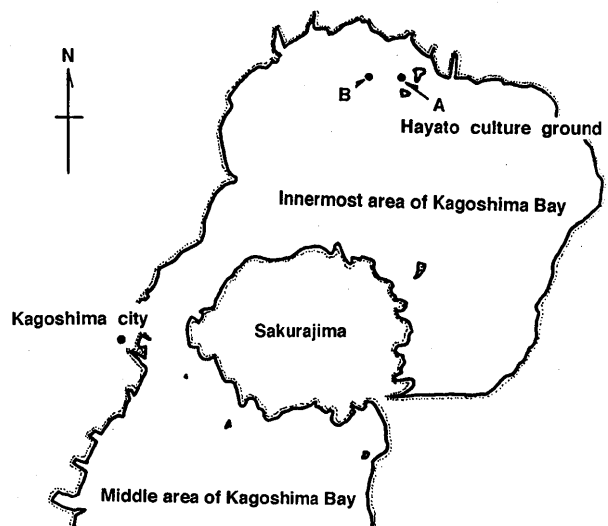


Fig. 5-1 Location of the Hayato culture ground (A) and recording site (B) of ambient noise.

Table 5-1 Fishes of which swimming sounds were recorded in respective net cages

Species	Body weight(g)	Individual number
<i>Pagrus major</i>	1,500	10,000
<i>Seriola quinqueradiata</i>	1,500	3,000
<i>Seriola lalandi</i>	170	7,000
<i>Seriola dumerili</i>	650	6,000
<i>Tokifugu rubripes</i>	600	5,000

5.2 解析方法

5.2.1 魚群遊泳音波形の抽出

竹村¹⁰⁹⁾は、浮魚魚群が発する音は魚の遊泳行動に伴って発する遊泳付随音がほとんどで、その卓越周波数は1 kHz以下であるとしている。そこで魚群遊泳音波形の特徴を抽出するために、信号解析装置を用いてデータレコーダに収録された生簀内水中音からサンプリング点数46,080点、3.6秒間の連続時間波形を各魚種ごとに求めた。求めた波形はFig.5-3に示すように、80msごとの45区間に分割し、その波形の中から特徴的な波形を含むフレームを選び、周波数解析を行った。なおフレームとは、サンプリング点数1,024点の離散波形データで、前述の1区間を示す。

5.2.2 ゼロクロッシング法による魚群遊泳音波形の周期解析方法

養殖生簀内の水中音波形は、Fig.5-3に示すように魚種により周期と持続時間が異なる散発的なパルス状波形が見られる。時間波形 $x(t)$ を振幅 A 、角周波数 ω_0 、および位相 ϕ で表わすと、

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (27)$$

となる。また、周期 $T \sim T$ の区間において観測した時間波形 $x(t)$ の持つエネルギー E は、

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T x^2(t) dt \quad (28)$$

と表される。生簀内で見られるパルス波形は、この E が無限となる性質を示す継続波形¹⁴⁹⁾であり、かつ A 、 ϕ あるいは ω_0 の不規則な変化によって非確定的な性質を持つ不規則波形でもある。そこでここでは、この非定常確率過程として表わされる波形について、時間波形から波形の周期性の有無やその基本周期の抽出に用いられ

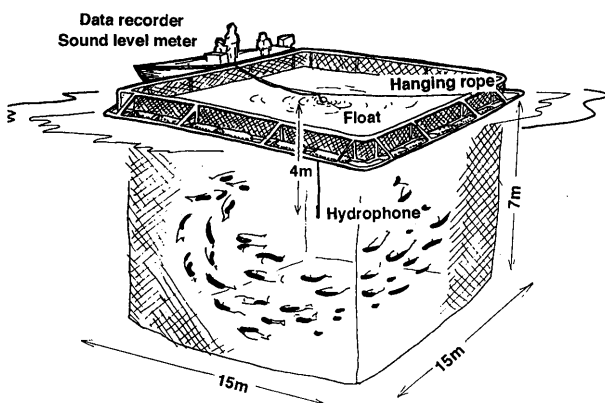


Fig. 5-2 Recording method of swimming sound in a net cage.

るゼロクロッシング法¹⁴⁹⁾を用いて解析を行った。

ゼロクロッシング法とは、Fig.5-4に示すように解析対象とする時間波形の振幅が正から負、負から正に向かって振幅ゼロの横軸、すなわち基線を切る点（以下ゼロクロス点と呼び、 C_n と表わす。）が時間軸上のどの時刻に存在しているかを求め、その時間間隔からゼロクロス周期を求める方法である。解析はまず、データレコーダに収録された信号を実験室にて再生し、竹村¹⁰⁹⁾が示した1kHz以下の周波数に注目するために、信号解析装置を用いて最高解析周波数が1kHzとなるようにサンプリング周期2.56kHzでA/D変換を行った。このデジタル化された信号は、GP-IBを介してパソコンに転送し、サンプリング点数46,080点の18秒連続時間波形としてフロッピーディスクに記録した。なお、この波形を直

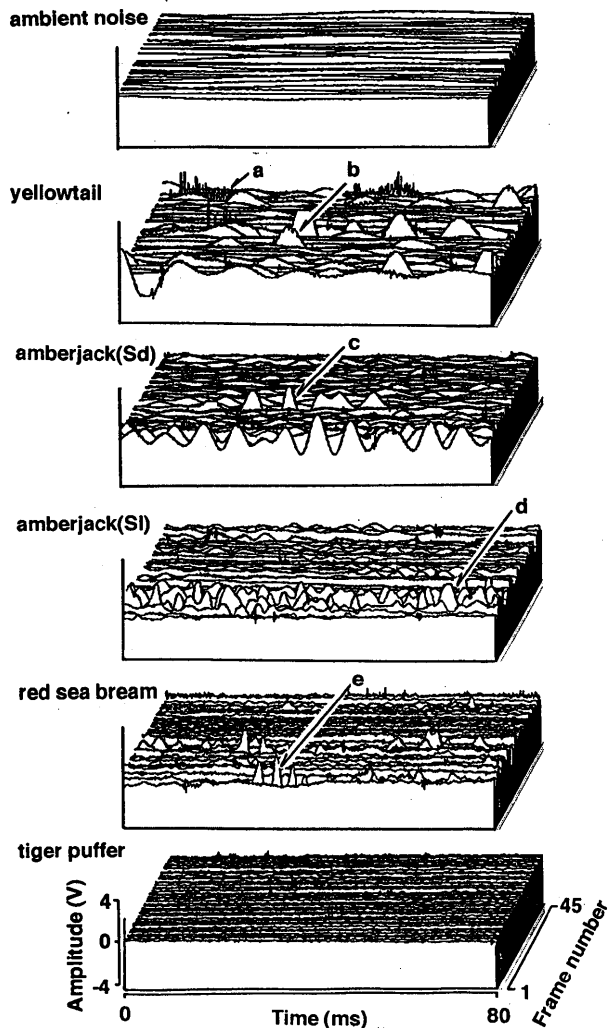


Fig. 5-3 Multiframe waveforms of underwater sound in net cage and typical waveforms of underwater sounds (a)~(e).
amberjack (Sd), *Seriola dumerili*; amberjack (Sl), *Seriola lalandi*.

接ゼロクロッシング法で解析した場合、微弱な短周期成分 a が検出されず、それと重なった振幅の大きな長周期成分 b を検出する。また振幅が大きな波形 c であっても、ピーク間の中央値において基線を横切らないため、実際その周期の検出には厳密さを欠くという問題がある。さらに養殖生簀内の水中音には散発的に出現するパワーの強いテンプラノイズ d および基線付近に見られる微弱な短周期成分 e が見られる。この波形の存在は、ゼロクロッシング法による周期検出において微弱な短周期成分の頻度を著しく上昇させる結果となる。そこでゼロクロッシング法を行うにあたり、サンプリングされた連続時間波形に、デジタルフィルタとして Savitzky-Golay の重み係数¹⁵⁰⁾を用いた17点平滑化処理を行い、f, g のようにテンプラノイズの影響を抑えた。次に C_n は、平滑化処理された時間波形データが離散データのため、 C_n を挟む両サンプリングポイントの値から一次補完し、按分比例によって近似値を求めた。ゼロクロス周期 T_n は、求めた C_n, C_{n+1} から時間間隔を求め、それを T_n の 1/2 周期とした。

なおゼロクロッシング法によって検出された周期データは、頻度分布による統計的表記により、魚種ごとの比較を行った。なお周期階級の級間は、1/3 オクターブバンドに準じた周期に設定し、その級間の中央値を級代表値とした。これは横軸の周期を対数目盛とした時、周期階級の境界値が等間隔で並ぶように設定することにより、各階級に属するゼロクロス周期の確率に差を生じさせないためである。この方法を用いて時間軸上に現われる

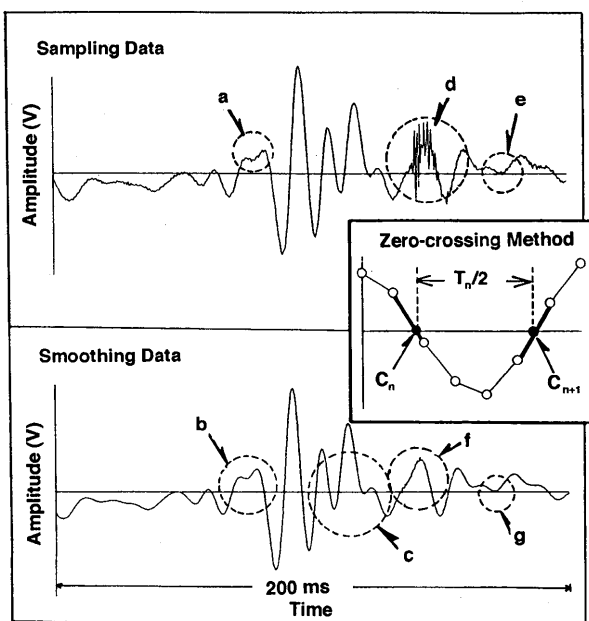


Fig. 5-4 Data analyzing process by zero-crossing method. ○, sampled data; ●, zero-cross point.

パワーの強い遊泳音波形の卓越周期、周期変化、パワーおよびその持続性の特徴を求めた。

5.3 結果

5.3.1 生簀内水中音の特徴

魚種別養殖生簀内水中音および周囲雑音の平均 1/3 オクターブバンド分析 (中心周波数 16Hz~16kHz, 平均回数100回, 計測時間約3分間) の結果を Fig.5-5 に示す。各生簀内水中音の極大周波数は、ブリ, カンパチ 64 Hz, マダイ, ヒラマサ 160Hzであったが、トラフグには顕著な極大周波数は認められなかった。また全生簀の 1kHz 以上の 1/3 オクターブバンドレベルは、ほぼ同じレベルで増加しているが、周囲雑音にはそのような傾向はなく、4kHz 以上で生簀内よりも約 10dB 低くなった。ただし周期の長いパルス状波形を持たないトラフグ生簀では、1kHz 以下のレベルが周辺海域の水中音よりも低くなった。以上より、生簀内水中音は、トラフグ生簀を除き 200Hz 以下に主極大周波数を持ち、1kHz 以上でバンドレベルが高くなるため、両者の境界である約 200Hz ~ 1kHz が凹状となるスペクトルを示す。

5.3.2 魚群遊泳音の特徴

Fig.5-3に示すように、周囲雑音波形は、生簀内水中音波形に比べ平坦で、振幅の大きな波形は見られなかった。しかし魚群が遊泳する生簀内の水中音波形には、散発的に発生する振幅の大きな2種類のパルス状の波形が見られた。まずその一つは、生簀内全ての波形に存在する周期の極めて短い波形 a であり、他の一つは生簀内の魚種により多少異なるが前者に比べ周期がやや長い波形 b~e である。またこれら特異な波形は、その出現頻度や持続時間および振幅にそれぞれ相違が見られる。ただしトラフグ生簀では前者のみが観察され、後者の特徴を

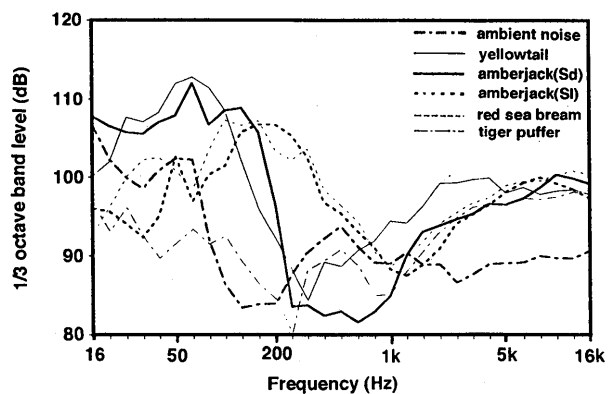


Fig. 5-5 1/3 octave band level of underwater sounds in net cage (0 dB re 1 μ Pa).

持つ波形は見られなかった。

そこで養殖生簀内の連続時間波形の中から特徴的な波形 a~e を含む 5 つのフレームを抽出し、それぞれのフレームについて周波数解析を行い、その結果を Fig.5-6 に示した。これより各フレームの波形の周波数特性を比較すると、全ての生簀内で見られる波形 a を含むフレームでは、500Hz 以上の高周波成分が支配的であるのに対し、周期の長いパルス波形 b~e を含むフレームでは、75~175Hz に主極大周波数を持つ周波数特性が見られた。この結果はあくまでも 1 フレームの分析結果であり、これから即魚種による周波数特性の違いを述べることはで

きないが、個々の波形の特徴として主極大周波数を見ると、ブリで 75Hz、カンパチで 112.5Hz、ヒラマサで 162.5Hz およびマダイで 175Hz となった。なお Fig.5-6 の b には、テンプラノイズと呼ばれる高周波パルス波形が重なって存在するため、500Hz 以上の周波数帯では c よりも 20dB 高い値を示した。

これより散発的に出現するパルス状波形が含まれる 1 フレームの周波数解析結果 (Fig.5-6) が遊泳音を含む生簀内水中音の周波数解析結果 (Fig.5-5) とほぼ一致することから、これらの波形が魚の遊泳音であると推察する。

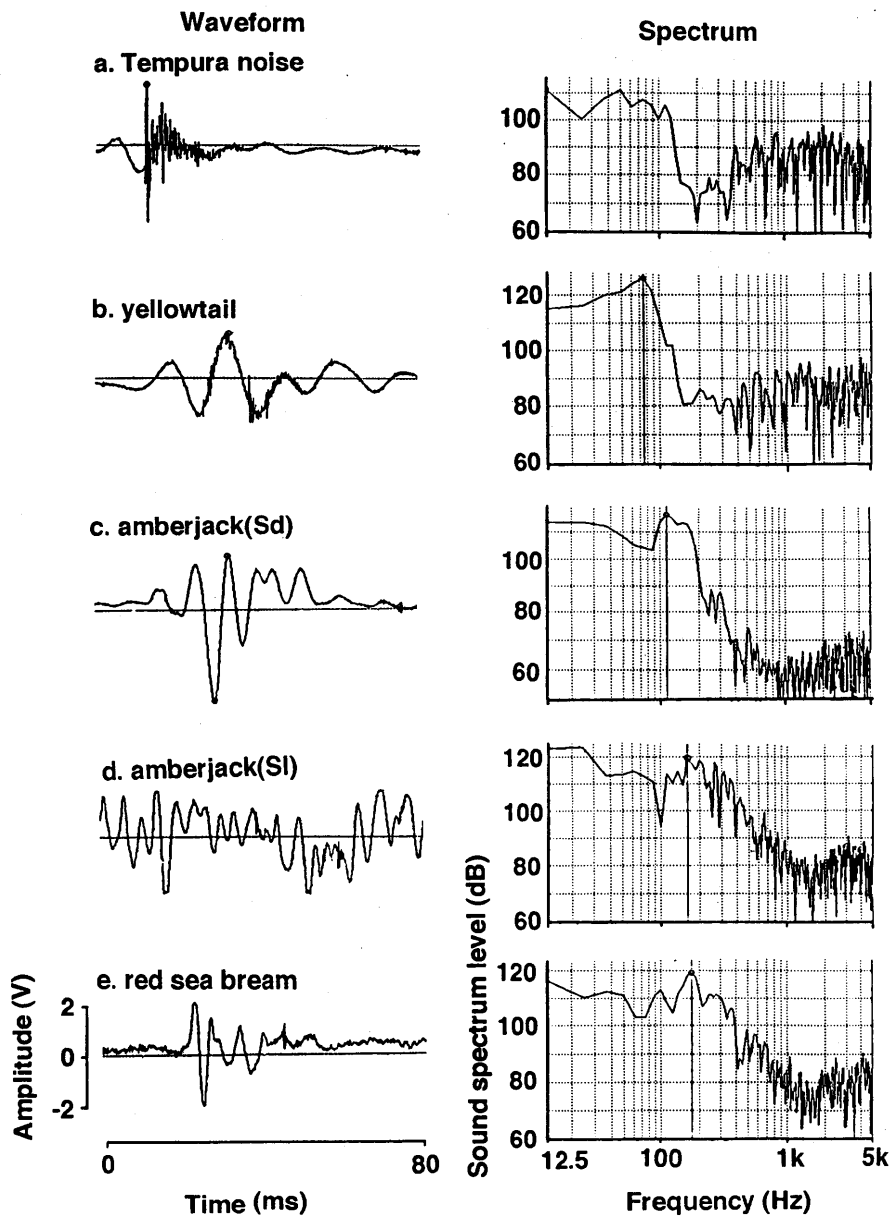


Fig. 5-6 Typical waveforms of underwater sound and the sound spectrum in net cages.
○, maximum frequency (0 dB re $1 \mu \text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

5.3.3 ゼロクロッシング法による魚群遊泳音の解析結果

1) 魚種別遊泳音周期頻度分布

遊泳音の特徴として考えられるパルス状波形の周期変動、および持続時間のように時間軸上を刻々と変化するものに関しての解析には、連続時間波形を区間で区切るFFT解析では不都合であるため、時間波形の特徴を生かす時間軸上での解析が必要である。

ゼロクロッシング法で求めた遊泳音の周期の魚種別周期頻度分布を Fig.5-7 に示す。卓越周期は魚種によって異なり、マダイ、ヒラサマ、カンパチでは10ms、トラフグでは12.5ms、ブリでは20ms および周囲雑音では200ms となった。また周期頻度分布パターンは、ブリ、カンパチでは卓越周期をピークとした尖状分布パターン、トラフグではなだらかな一山分布パターンおよびマダイ、ヒラマサでは卓越周波数の長周期側に肩部を持つ分布パターンを示す。しかし周囲雑音では100ms 以下の周期にはほとんど分布せず、200ms に卓越周期を持つ一山分布パターンを示す。これはハイドロホンが海面に生じた波により動揺した結果によるものと推定する。

2) 遊泳音周期- P_{max} 頻度スペクトル

次に前述したゼロクロッシング法による周期頻度解析では、周期のみに着目して振幅の大小には一切触れられていない。そこでゼロクロス周期と波形のパワーとの関係を求めるために、平滑化された遊泳音波形を2乗し、隣接するゼロクロス点間 $C_n \sim C_{n+1}$ におけるパワー最大値 (以下 P_{max} と記す。) を求め、周期と P_{max} の関係を調べた。なお P_{max} は 0.01, 0.1, 1 (V^2) の境界値を持つ区間ごとに頻度を求めた。ゼロクロス周期とその周期における P_{max} の頻度スペクトルを Fig.5-8 に示す。

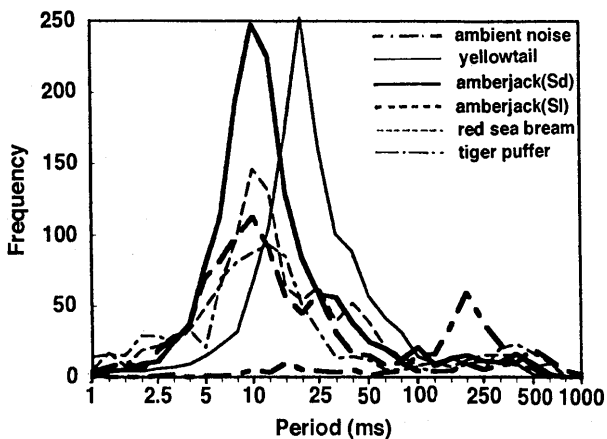


Fig. 5-7 Frequency histogram for the periods of swimming sounds in net cages and of ambient noise.

全体的な傾向として卓越周期よりも短周期側の頻度は、パワーの増加に伴い卓越周期に収束する傾向が見られる。魚種別に見るとブリでは卓越周期を中心に強いパワーの波形が分布しているが、同様な分布パターンを示すカンパチでは、強いパワーの波形の頻度が低い。マダイに見られる卓越周期の長周期側に肩部を持つ分布は、パワーの増加に伴い頻度が減少するが、その分布パターンは保たれる。ヒラマサではマダイと同様な分布パターンを示すとしたが、パワーの増加に伴い卓越周期が10ms から12.5ms へ、またその分布パターンも全体的に長周期側に移動し、肩部には明らかなピークが出現して二山型分布を示した。トラフグでは卓越周期は存在するが、その波形のパワーは弱く、Fig.5-7の周囲雑音に見られるような長周期成分のみパワーを持つ波形が存在した。これより各魚種の遊泳音の卓越周期は、100ms 以下の短周期成分が主であり、魚群の存在しない周囲雑音と周期100ms を境界として分離することができる考えた。

3) 魚種別遊泳音持続時間

Fig.5-9 は、上記境界値100ms 以下の周期を持つ波形の持続時間を遊泳音の持続時間とし、その頻度分布を求めたものである。なおこの階級値は1/1 オクターブバンドに準じた。遊泳音の卓越周期持続時間は5魚種のうち卓越周期が最も長いブリが最長で250ms、マダイ、カンパチで125ms そしてヒラマサが最短で64ms となった。遊泳持続時間はハイドロホン付近を遊泳する魚群の遊泳状況の差を示す一つの指標となりうる可能性を秘めている。

このように今回行ったゼロクロッシング法の遊泳音周期解析への応用によって、遊泳音波形の周期頻度、パワーおよび持続性の3要素から周波数解析で得ることができなかった特徴、また判断することが困難だった特徴を見出すことができた。

5.4 考察

竹村⁽¹⁰⁾ は、遊泳音の存在や極大周波数の相違はそれら遊泳形態、魚体型に起因すると述べ、これは Fig.5-5 の連続時間波形からも魚種による波形の周期、発生頻度、持続時間、および強度等が様々であることがわかる。Fig.5-10 は、各魚種のゼロクロッシング法による卓越周期を周波数に変換したものと、各魚種生簀の1/3 オクターブバンド分析結果を比較したものである。ゼロクロッシング法による卓越周波数は、ブリ50Hz、トラフグ80Hz、カンパチ、マダイ、ヒラマサ100Hz となった。これを1/3 オクターブバンド分析結果と比較すると、

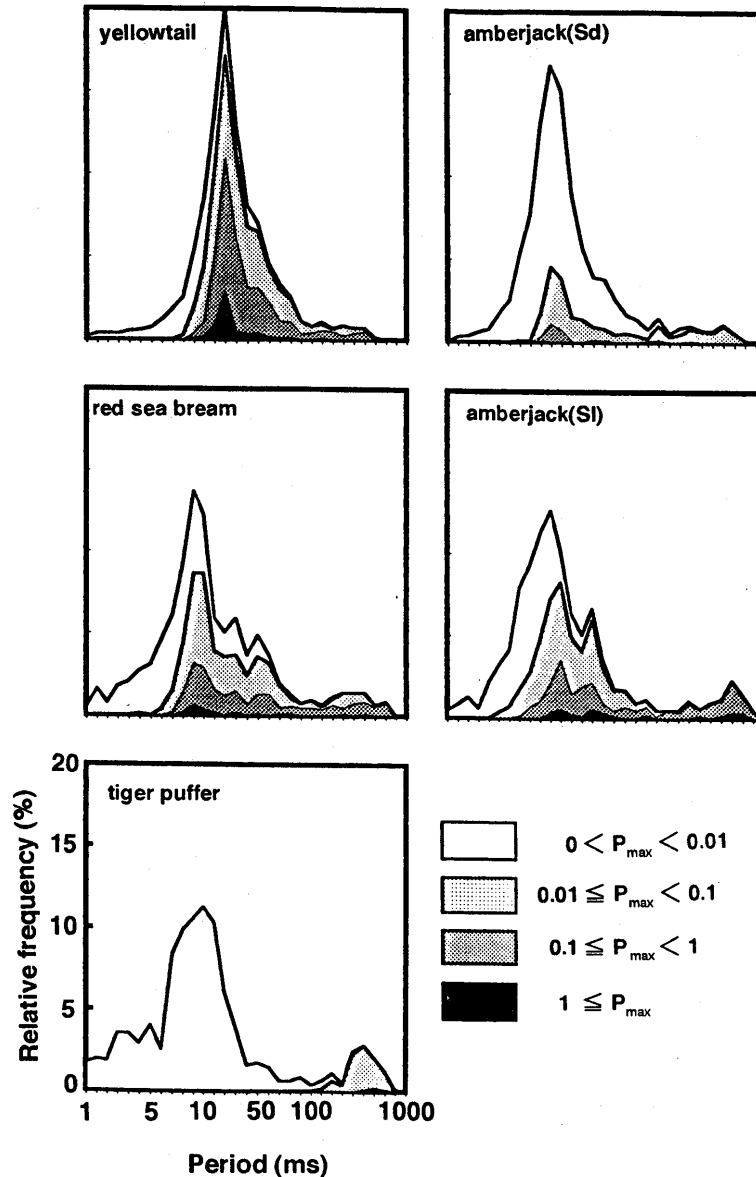


Fig. 5-8 Period-frequency spectra of swimming sounds.
 P_{max} , the maximum power level (V^2) in a period.

カンパチを除いてゼロクロッシング法により求めた卓越周波数が低周波に偏する傾向が見られた。またブリ、カンパチは、1/3オクターブバンド分析では相違を判別するのが困難であったが、ゼロクロッシング法では、ブリはカンパチの2倍の周期を持ち、パワーの強い遊泳音を発していることがわかった。またトラフグの場合、1/3オクターブバンド分析では、判別しにくい、ゼロクロッシング法では12.5msに卓越周期を持つパワーの低い波形が存在することがわかった。さらにマダイ、ヒラマサのように肩部を持つ周期傾度分布を示す魚種では、パワーの強い周期においてもその分布パターンの形状的

特徴が保たれたことから、パワーの強弱にかかわらず、遊泳音の周期変動が大きいことを意味し、松野ら³⁾が示した周波数帯域の広がりとも一致する。

遊泳音の周波数組成について竹村¹⁰⁹⁾は、群を構成する個体数の増減には影響されないが、個体数の増加によりパワースペクトルレベルが一様に増加すると述べている。また魚種により遊泳音の卓越周波数、周波数組成が異なる結果も得られている。^{3, 5, 10, 109, 111)} 本解析結果より、高速かつ一定速度で遊泳する大型浮魚では、遊泳音の周期はほぼ一定しており、かつそのパワーは強い傾向があるのに対し、遊泳、停止、急発信、急回転を繰り返すマ

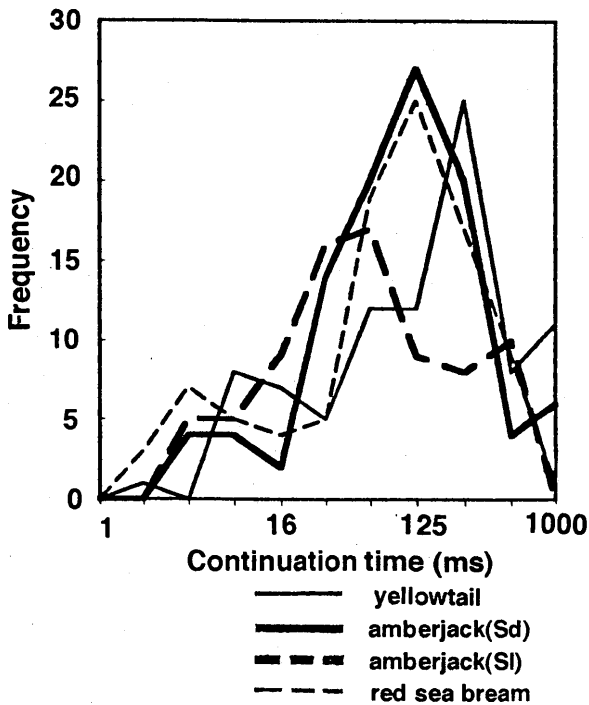


Fig. 5-9 Continuation time of fish swimming sounds in net cages.

ダイや小型のヒラマサでは、遊泳音の周期にばらつきが生じる傾向があった。カイワリ属の bar jack *Caranx ruber* は、遊泳時の急激な方向転換で音を作り出すという報告があることから、¹⁵¹⁾ 魚種による遊泳音の周波数特性は、魚群の遊泳形態すなわち群行動の相違と遊泳方法およびその体型に起因すると推察される。

しかし、持続時間が500ms以下で卓越周波数も100 Hz以下のパルス音である遊泳音は、浅海特有の周囲雑音や海中放射雑音とは異なった波形の特徴を持ち、さらに卓越周波数の1/3オクターブバンドレベルも110dB前後であることから、自己発生源として自己の受波能力に多少の影響を与えているとは考えられるが、周囲の水中音環境に影響を与えるような雑音源ではない。

第6章 魚類の聴覚特性

魚類は可聴周波数範囲がほぼ3kHz以下と狭いため、船舶放射雑音やテンプラノイズ等の広帯域周囲雑音のうち、低周波域の狭帯域信号のみを聞いていることになる。また魚種により聴覚感度や可聴周波数範囲が異なるため、同じ広帯域雑音でも魚種によって聞こえる音色や音圧レベルが異なると思われる。

魚類は、キンギョ *Carassius auratus*、マダイ、ニジ

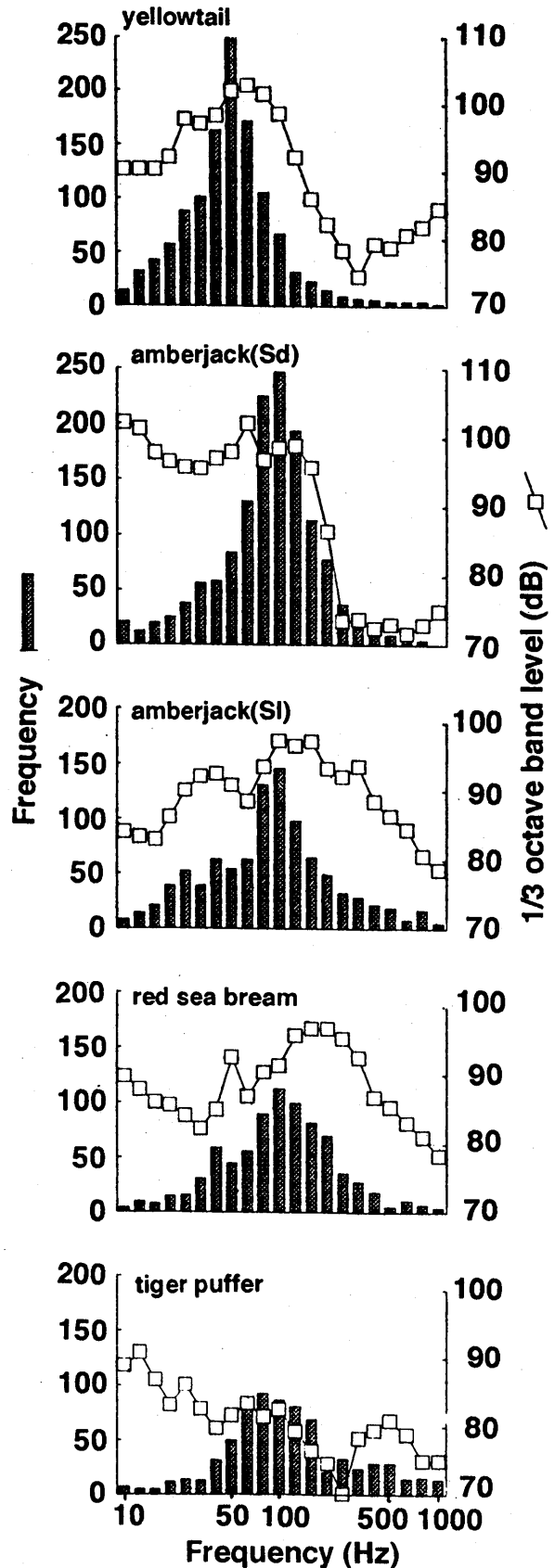


Fig. 5-10 Comparison of zero-crossing method and averaged 1/3 octave band analyses for fish swimming sounds in net cages (0 dB re $1 \mu\text{Pa}$).

マスなどの鰾を持つ鰾魚と、それを持たないヒラメ、マコガレイなどの無鰾魚に分けることができ、後者の聴覚能力は増幅器の役割の鰾を持つ前者に比べ劣るとされている。有鰾魚に関する研究はこれまで多く行われてきたが、無鰾魚の聴覚能力に関する研究は、それに比べ少なく、ツノガレイ属の *Pleuronectes platessa* (Chapman and Sand¹⁵²), Karlsen and Sand¹⁵³), マコガレイ属の *Limanda limanda* (Chapman and Sand¹⁵²), およびマコガレイ (張ら⁷⁹) のオーディオグラムについてのみとなっている。

そこで本章では、無鰾魚のヒラメのオーディオグラムの測定を中心に、予備実験としてティラピアのオーディオグラムを測定し、また鄭らの資料を整理してマアジのオーディオグラムを求めた。なおヒラメは、*Pleuronectes platessa* や *Limanda limanda*,¹⁵² および *Atlantic salmon Salmo salar*¹⁵⁴ と同じく粒子運動のみを感じる魚種であるが、ここでは遠距離音場で有効な音圧に対する閾値を求めた。また浅海域には、船舶航走雑音のように周波数が非可聴域から可聴域へ緩やかに変化する持続音が存在する。そこで可聴範囲の狭いヒラメでは、他の魚種に比べその境界が明瞭に現れると考え、周波数が非可聴域から可聴域へ時間と共に変化する音刺激(スイープ音)に対する反応の測定を試みた。

なお、オーディオグラムの測定方法は、条件付けを用いる心理学的手法と直接聴覚神経から音刺激の応答を採取する神経生理学的手法¹⁵⁵とに大別される。さらに心理学的手法は、条件付けの種類により、行動の起源とは無関係な条件刺激と無条件刺激の対提示で行われる古典的条件付け^{61, 156, 157}と、行動が報酬を獲得したり罰を回避したりするための道具として機能する道具的条件付け^{76, 158-161}に分けられる。Popper¹⁵⁶は、キンギョのオーディオグラムが報告者によって異なることを指摘し、その原因は逃避条件付けや正の走性による条件付けおよび古典的条件付けの3種類の測定方法によるものではなく、測定音響環境に起因しているとしている。しかし逃避条件付け、正の走性による条件付けのように供試魚が水槽内を自由に遊泳する場合、^{76, 158-161}水槽内の複雑な音圧分布による測定誤差や粒子変位の影響を受ける。よって魚類の聴覚特性を狭い水槽内で実験する場合、供試魚を一定箇所に固定する測定方法が望ましい。

また条件反応の測定は、体内に挿入した電極針を通して心電図を得る方法では、電極針挿入後の出力信号調整が困難で、さらに挿入の失敗や脱落などの問題点があった。電極針を用いずに心電図を得る方法には、山森ら¹⁶²のウナギ *Anguilla japonica* での水中電極法、難波ら¹⁶³

の体表導出法および小島らのニジマスの電極接着法¹⁶⁴などがあるが、これらの方法も心臓起電力の弱い魚種では検出される電圧が低いという問題点がある。古典的条件付けの条件反応の測定には、反応の検出が簡単でその数量化が容易な方法が望まれる。

そこで本実験では、これまで用いられてきた心電図による方法に加え、呼吸周期の変化として現われる条件反応を非挿入型フィルムセンサを用いて測定する方法を試みた。

さらに魚類にとっての水中音環境は、ハイドロホンで受波した水中音を単に音圧レベル(オーバーオール値)だけで画一的に評価するべきではない。ここでは種々の周囲雑音が魚種によってどのように聞こえているかを探る一つの手段として、ヒラメ、マアジ、マダイのオーディオグラムから、魚種ごとの聴感補正曲線を作製した。

6.1 供試魚

供試魚には、ティラピア、および無鰾魚のヒラメを用いた。まず実験Ⅰでは、心電図を用いてティラピアのオーディオグラムを測定した。実験Ⅱでは、呼吸周期変化から条件反応を測定する方法を確立するため、予備実験としてティラピア(実験Ⅱ-1)およびヒラメ(実験Ⅱ-2)の最小可聴値を測定した。実験Ⅲでは、呼吸周期変化からヒラメのオーディオグラムを測定し、実験Ⅳではさらにスイープ音に対する反応を測定した。なおマアジについては、鄭ら⁸⁰の資料を再検討し、オーディオグラムを求めた。

ティラピアは、鹿児島県始良郡隼人町干拓地の用水路にて自然繁殖したものを採取し、実験まで約5ヶ月間、鹿児島大学水産学部鴨池海洋生産実験室の飼育水槽で飼育した。ヒラメは、鹿児島県喜入町の間育育成場より購入し、同飼育水槽で3ヶ月間飼育した。供試魚は、実験Ⅰでは全長160~240mmのティラピア20尾、実験Ⅱでは全長221~280mmのティラピア3尾と全長270~344mmのヒラメ7尾、実験Ⅲ、Ⅳでは全長370~395mmのヒラメ7尾を用いた。なお供試魚には、飼育水槽から無作為に抽出したものをを用いた。

6.2 測定装置

6.2.1 音響実験用遮音室

本測定では、実験水槽内の背景雑音低減のため、横3m、幅2m、高さ2mの船用保冷コンテナを改造し、Fig. 6-1に示す音響実験用遮音室(以下遮音室)を製作した。遮音室内にはスピーカーを設置するために鉄製フレームを設け、室内での音の反射を防ぐため、そのフレーム

周囲を毛布で覆った。実験水槽には、56×80×50cmの角型水槽を使用し、床から伝わる振動低減のため水槽下に防振ゴムを敷いた。

遮音室による遮音効果の指標となる減衰量と音響透過損失および背景雑音の測定は、水槽内の魚固定位置に設置した hidroホン ST1020 を用いてデータレコーダに収録し、信号解析装置によって1/3オクターブバンド分析を行った。遮音室による減衰量は、静寂時における前面ドア開閉による水中音の1/3オクターブバンドレベル差より求めた。また音響透過損失は、遮音室前面ドアから外側2mの位置に設置した空中スピーカから空中音圧レベル90dB (0dB re 20 μ Pa) のホワイトノイズを放音し、同じく前面ドア開閉による水中音の1/3オクターブバンドレベル差より求めた。さらに背景雑音スペクトルレベルは、前面ドアを閉めた状態で測定された水中音を1/3オクターブバンド分析し、帯域幅1Hzに換算して求めた。

6.2.2 条件刺激発生装置

条件刺激としての音刺激、および無条件刺激としての電気刺激の発生は、Fig.6-2に示すパソコンと信号発生装置NF1930 (NF回路ブロック設計) をGP-IBインターフェイスで接続させた自動音・電気刺激発生システムを用いた。特にFig.6-2 (下) に示すフィルムセンサによる条件反応測定では、反応信号のデジタル信号化によって、刺激の提示から反応の測定・解析までの全過程をパソコンによる統一制御とし、人為的誤差の防止と

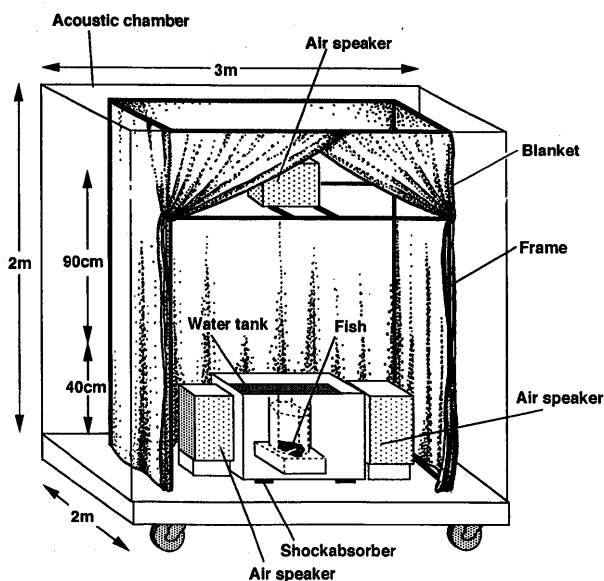


Fig. 6-1 Experimental water tank and acoustic chamber for measuring the auditory threshold of fish.

測定の簡素化をはかった。これより約2時間で1つの閾値測定が可能となった。なお水中音圧計および心電計の交流電源雑音対策として屋外の45t海水水槽に50×50×0.2cmの銅板電極を沈め、すべての交流機器のアースとして使用した。

条件刺激としての音刺激は、信号発生装置で発生させたトーンバースト信号を増幅器で増幅し、空中スピーカから水中へ透過した。音源は、Fig.6-2に示すように実験Iでは、魚体背方向となる水面上90cmに設置した口径12cmの空中スピーカFE127 (Fostex)、実験II~IVでは、魚体側面となる水槽両側面に空中スピーカSC3-LR (PIONEER) 一対を配置した。空中から水中への音波の透過は、水中と空中の音響特性インピーダンスが大きく異なるため、音圧成分は入射音圧の2倍となって透過するが、粒子速度は約0.1%しか透過しない。よって空中スピーカは水中スピーカに比べ粒子変位の影響を小さくすることができる。また同位相で駆動される2個の空中スピーカで水槽を挟むことによって、水槽中央部の粒子運動をキャンセルさせた。なおヒラメは、*Pleuronectes platessa* や *Limanda limanda*,¹⁵²⁾ および Atlantic salmon¹⁵⁴⁾ と同じく鰾を持たない無鰾魚で粒子運動のみを感じるが、ここでは遠距離音場で有効な音圧に対する閾値を求めた。

無条件刺激としての電気刺激は、信号発生装置で発生したトーンバースト信号に同期したトリガ信号を利用し

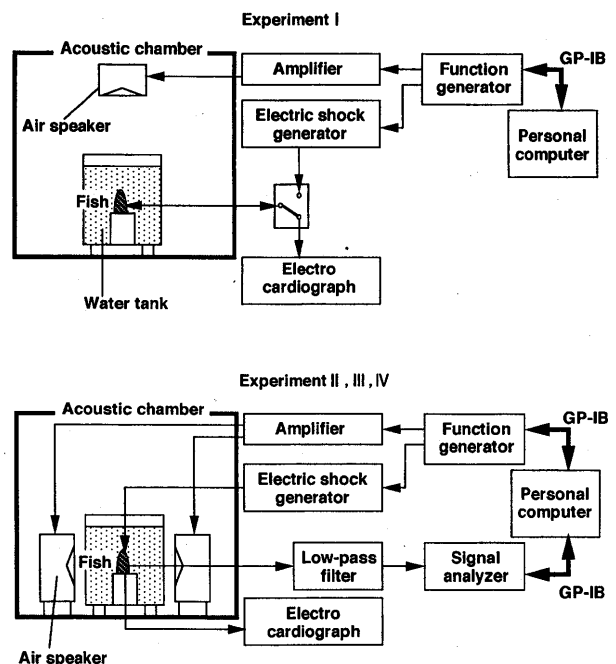


Fig. 6-2 Block diagram of the apparatus and equipment used in the experiments.

て、電気刺激発生装置で発生させた。

条件反応の測定は、実験Ⅰ～Ⅱでは Fig.6-3 上段に示す双極電極針、実験Ⅱ-1では中段に示す双極電極針、実験Ⅱ-2～Ⅳでは圧電フィルムセンサ LDT1-028K (Kynar: 以下単にフィルムセンサと記す) を用いた。双極電極針は、バーナーで延ばした2本の釣針のどう部分にビニールケーブルを接続し、長さ25mm、電極間隔4mmとなるようにウレタンゴムに刺し、補強と絶縁のために電極の先端部10mmを残してエポキシ樹脂によって被膜したものである。またフィルムセンサは、大きさ72×16×0.2mmのフィルム状で、機械的歪を与えることにより電圧が発生(圧電効果)する微分出力型圧電センサである。

供試魚の固定方法および電極針、フィルムセンサ、水中電極の装着方法を Fig.6-4 に示す。魚体固定位置の決定は、水槽中央鉛直線上における水深別背景雑音を測定し、背景雑音が最も低い水深(実験Ⅰ、背鰭が水面下10cm; 実験Ⅱ～Ⅳ、腹鰭が水槽底面上8cm)とした。魚体の固定は、実験Ⅰでは電極針脱落を防ぐため、網で魚体を挟み固定した。実験Ⅱ-1では、ティラピアの鰓蓋運動への影響を防ぐため、尾部をスポンジで挟み、腹部・頭部を網で囲んで固定した。実験Ⅱ-2, Ⅲ, Ⅳでは、ヒラメが海底面に着底する性質を利用し、魚体型とほぼ一致した囲い網内の底面に着底定位させるだけとした。ティラピアへの電極針挿入は、実験Ⅰでは皮膚が柔らかく挿入の容易な胸鰭基底部から、また実験Ⅱ-1では腹部前方からそれぞれ囲心腔を形成する筋肉に向けて挿入した。フィルムセンサは、ティラピアでは魚体側面から鰓蓋に接触させ、ヒラメでは魚体上部からアームを

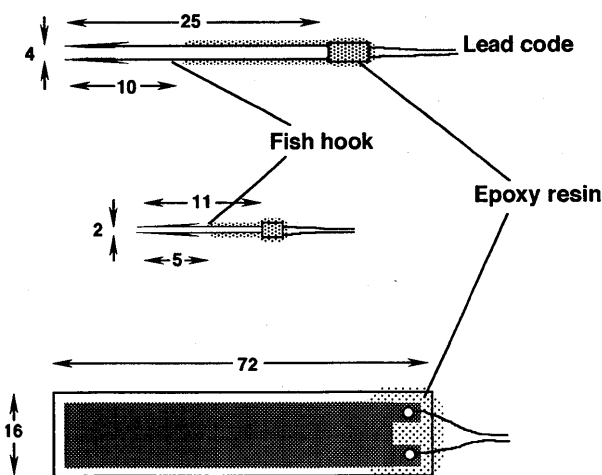


Fig. 6-3 Bipolar electrode and piezoelectric sensor. Top, bipolar electrode for tilapia; mid, bipolar electrode for Japanese horse mackerel; bottom, piezoelectric sensor.

用いて鰓蓋に接触させた。電気刺激は、実験Ⅰのティラピアでは電極針から、実験Ⅱ-1では胸部の網に設けた電極から、ヒラメではアームと底面に設けた電極から与えた。

放音時の水中音圧レベル(0dB re 1μPa; 以下単に音圧と記す)の測定は、供試魚と同一位置に hidroホン ST-1020を設置し、水中音圧計のレベルメータを読み取った。測定に使用した100Hz～1.5kHzの各周波数の音刺激の水中音波形を Fig.6-5 に示す。信号発生装置から発生したトーンバースト信号は、スピーカーの音響特性や水槽内での反射および干渉などにより、水中では波形が乱れて300Hzと500Hzでは2つのピークを持つ波形となった。また500Hzと1.5kHzでは同一振幅のバースト信号にもかかわらず300Hzに比べ10dB低い結果となった。よって放音音圧は、バースト音の最大音圧レベルとし、測定周波数および測定段階のすべての音圧レベルをあらかじめ測定してから実験を行った。

実験水槽の水温は、飼育水槽とほぼ同じティラピアで

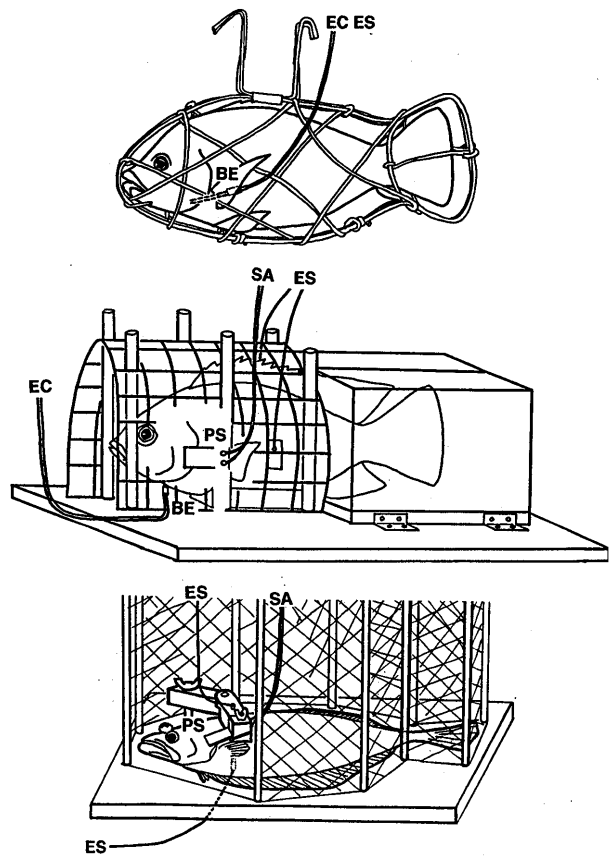


Fig. 6-4 Fitting method of bipolar electrode and Piezoelectric sensor to the test fish.

PS, Piezoelectric sensor; BE, bipolar electrode; SA, to signal analyser, ES, from electric shock generator; EC, to Electrocardiograph.

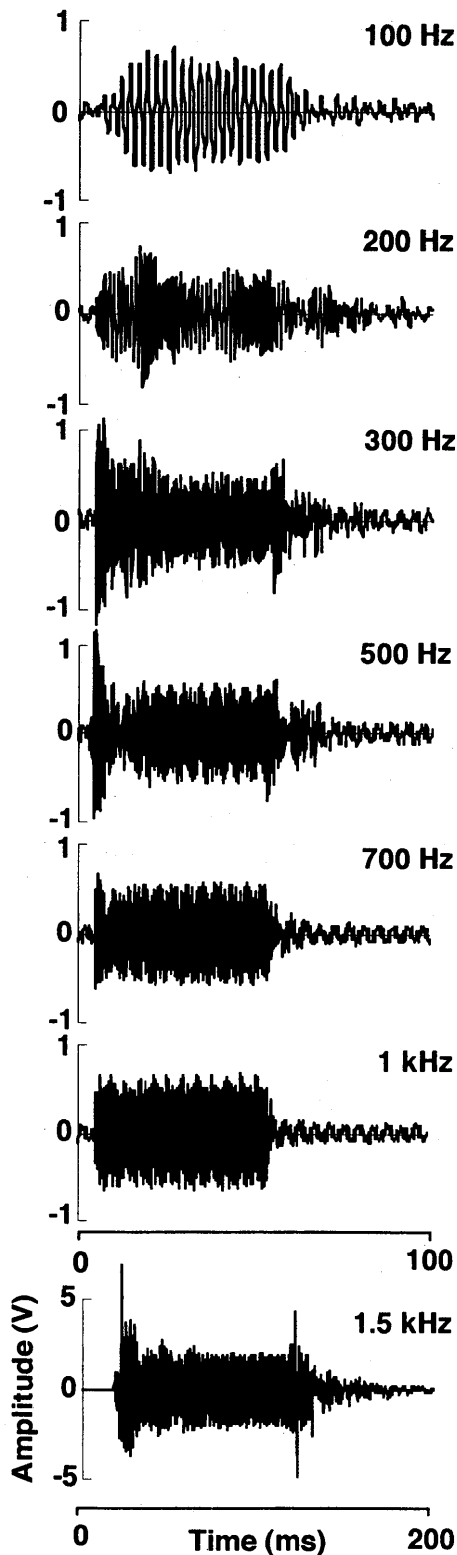


Fig. 6-5 Sound wave forms of each frequency projected at the fish hold position.
The sound pressure level, 110 dB (0 dB re $1 \mu\text{Pa}$).

は平均水温 23°C 、ヒラメでは平均水温 17.6°C であった。以上の測定装置は鹿児島市の鴨池臨海実験場の屋内に設置した。

6.3 測定方法

6.3.1 条件付け

聴覚閾値の測定には、音刺激を条件刺激、電気刺激を無条件刺激とした古典的条件付けを用い、心拍間隔の延長または呼吸の抑圧として現われる条件反応から音の知覚を知る方法を用いた。実験Ⅰ～Ⅳの条件付けおよび閾値測定時の諸条件を Table 6-1 に示す。実験Ⅰでは、供試魚のテトラピアを 0.04% の MS-222 溶液に入れて軽く麻酔させてから電極針を挿入し、固定用枠に入れ実験水槽内の固定位置に懸垂した。なお条件付けまでの回復時間は 1 時間以上とした。実験Ⅱ-1 では、固定台に供試魚のテトラピアを固定した後、フィルムセンサを鰓蓋に接触させた。実験Ⅱ-2, Ⅲ, Ⅳでは、供試魚のヒラメを網内に入れ、底面に着底した後、アームを用いてフィルムセンサを鰓蓋に接触させた。なお実験Ⅱ～Ⅳでは麻酔を使用していないため、回復時間は設けなかった。

条件付けは、Ishioka *et al.*⁶¹⁾ の方法に従った。条件付けの音刺激には、実験Ⅰ～Ⅱ-1 では閾値測定と同一周波数のトーンバースト音を用い、電気刺激は音刺激放音終了 0.1 秒後に与えた。これらを 5 分毎に 7 回繰り返して条件付けを完了し、1 時間の休息後、閾値測定を行った。なお引き続き異なる周波数の閾値測定を行う場合には、新たに閾値測定と同じ周波数の音刺激で条件付けを行った。一方ヒラメは、*Pleuronectes platessa* や *Limanda limanda*¹⁵²⁾ 同様粒子運動のみを感知する魚種であり、可聴周波数範囲が狭く、高周波数では条件刺激が知覚できないと考えられる。よって実験Ⅲ, Ⅳでは、比較的感度が良かった 100 Hz のトーンバースト音を用いて般化させた。条件付け終了後、フィルムセンサの出力波形を信号解析装置で観察しながら、1 時間の休息を設けた。

6.3.2 条件反応測定法

1) 心電図

心電図を用いて古典的条件付けの条件反応を測定する方法は、これまで多くの研究者によって用いられており、ここでは Ishioka *et al.*⁶¹⁾ の方法を参考にした。閾値測定時の条件刺激の提示方法は、供試魚に対し各周波数における最小可聴値を十分下回ると推定される音圧レベルから、1 回ごとに 2.5 dB づつ上昇させながら提示する極限法¹⁶⁵⁾ (Fig. 6-6) を用いた。なお極限法による条件

Table 6-1 Classical conditioning and measurement

		Experiment 1 tilapia	Experiment 2 tilapia, bastard halibut	Experiment 3 bastard halibut	Experiment 4 bastard halibut
Preparation	Operation	○	×	×	×
	Recovering interval (h)	1	0	0	0
Conditioning (sound)	Conditioning stimulus Waveform	Tone burst	Tone burst	Tone burst	Tone burst
	Frequency	Same as measurement frequency	Same as measurement frequency	100 Hz	100 Hz
	Sound pressure level (dB)	120	130	130	130
	Continous time (s)	0.5	1	1	1
	Unconditioning stimulus (Electric shock)	Amplitude	DV 20 V	DC 15 V	DC 15 V
	Continous time(s)	0.1	0.1	0.1	0.1
	Delay form conditioning stimulus (s)	0.1	0.1	0.1	0.1
Method	Number of times	7	7	7	7
	Conditioning interval (min)	5	5	5	5
Rest	(h)	1	1	1	1
Measurement	Conditioning stimulus Waveform	Tone burst	Tone burst	Tone burst	Sweeping sound
	Frequency	100Hz-1.5kHz	200Hz-1kHz	70-500kHz	
	First sound pressure level	80-95 dB	67-92 dB	Estimated threshold-5 dB	
	Continous time (s)	0.5	1	1	20
Method	Projection	Ascending method 16 steps	Ascending method 20 steps	Up-down method	Up-down method
	Rate of increase	2.5 dB/times	2.5 dB/times	2.5 dB/times	
	Interval (s)	15	30	60	60
		Electrocardiogram	Respiratory activity	Respiratory activity	Respiratory activity

刺激の提示間隔は、実験Ⅰでは15秒間隔、実験Ⅱでは30秒間隔とし、上昇系列の提示段階は、実験Ⅰでは16段階、実験Ⅱでは20段階とした。

音刺激に対する反応の記録は、測定開始と同時に心電計FD-14（フクダ電子）を作動させ、25mm/sの速さで心電位の変化を記録紙に記録した。なお心電位の記録は、Fig.6-2のスイッチを電気刺激発生装置から心電計に切り替えて行った。

条件刺激に対する反応の判定は、条件刺激を与える前および与えた時の心拍間隔を測り、条件刺激を与える直前10個の平均値より与えた時の心拍間隔が有意に長い場合（ $\alpha=0.05$ ）を反応有（正の反応）とした。聴覚閾値は、16回の放声のうち初めて反応した音圧を最小可聴値とし、条件刺激に対する負の反応から正の反応への転換点、すなわち最小可聴値とその直前に放声した音圧（最小可聴値-2.5dB）との中央値とした。

2) フィルムセンサ

魚類の呼吸活動は、口腔の加圧ポンプと鰓腔の吸引ポンプの二重ポンプの働きによって形成されている。¹⁶⁶⁾ よって実験Ⅱではその鰓腔の吸引ポンプの活動、すなわち鰓蓋の開閉運動からフィルムセンサを用いて呼吸周期を測定し、条件反応として現われる呼吸の抑圧の有無から音の知覚を判定する方法を探った。まず実験Ⅱでは、前述

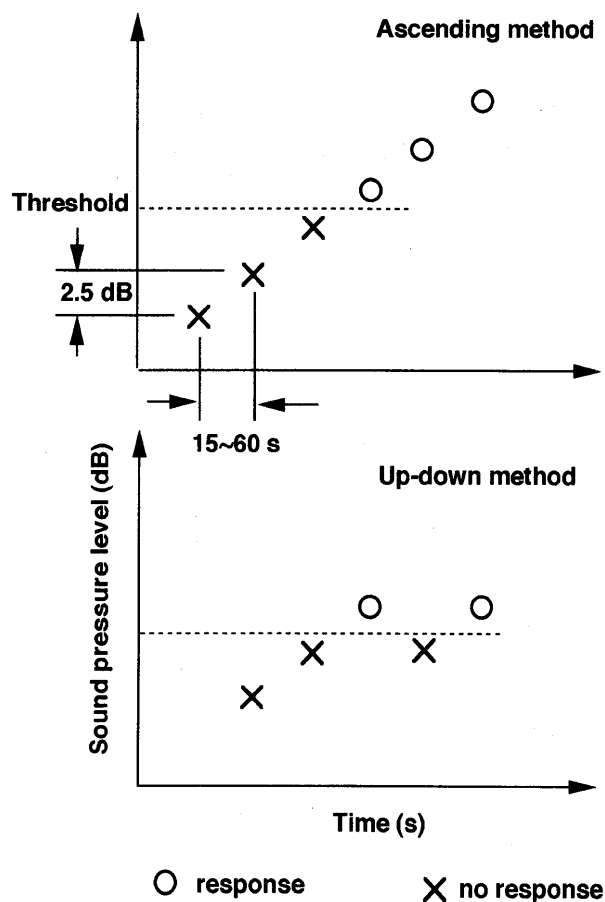


Fig. 6-6 Method of auditory threshold of determination.

した極限法を用いて測定を行った。しかしヒラメでは、200Hz以上で反応が散発的となったため、実験Ⅲでは、閾値測定時の条件刺激の発生方法として Fig.6-6 に示す上下法¹⁶⁾を用いた。この上下法とは、まず実験Ⅱ-2 で正の反応が見られた最低音圧より 5dB 低い音圧から、1 分間隔で 2.5dB ずつ増加させて放音し、正の反応が現われた場合、反応が負となるまで音圧を 2.5dB ずつ下げ、反応が負となった場合、再び正の反応が現われるまで 2.5dB ずつ増加させて放音する方法を指す。これを正の反応の出現ごとに繰り返し、同一音圧で 2 回正の反応を示した音圧を最小可聴値とした。

また実験Ⅳで用いたスイープ音の放音方法とスイープ時の音圧変化を Fig.6-7 に示す。測定に用いたスイープ音は、Table 6-2 に示す 20 秒間に非可聴周波数 (400

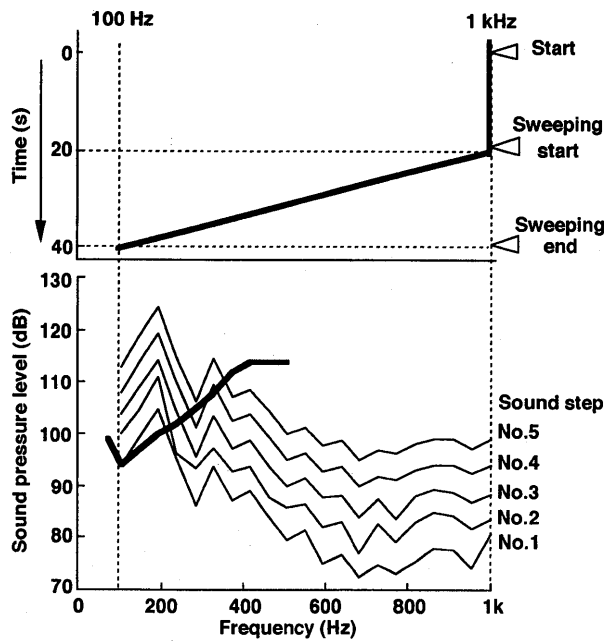


Fig. 6-7 Projecting method of sweeping sound (1 kHz → 100 Hz), and relation between the audiogram of bastard halibut (bold solid line) and sound pressure level's curves (solid lines) of sweeping sounds for five sound steps (0 dB re 1 μ Pa).

Table 6-2 Sweeping speed of sweeping sound

Sweeping start frequency (Hz)	Sweeping end frequency (Hz)	Sweeping speed (octave/20 s)
400	200	1
300	100	12/3
400	100	2
500	100	21/3
600	100	22/3
800	100	3
1,000	100	31/3
1,600	100	4

Hz~1.6kHz) から可聴周波数 (100Hz~200Hz) へピーク周波数が変化する持続音で、両者の組み合わせによりスイープ速度を 8 通りに設定し、1 組の測定は 5dB 間隔で 5 段階の音圧で行った。なおスイープ音の音圧変化は、水槽の音響特性によりスイープ速度に関係無く 190 Hz と 320Hz にピークが現われた。

フィルムセンサによって検出された信号は、カットオフ周波数が 20Hz のローパスフィルタ (24dB/octave) を通して信号解析装置に送り、そのメモリー上に実験Ⅱでは放音前後 10 秒間、計 20 秒間、実験Ⅲ、Ⅳでは放音前後 20 秒間、計 40 秒間の鰓蓋閉開運動の時系列データとして記録し、後にパソコンで呼吸周期の解析を行った。なお実験Ⅱ-1 の 300Hz では、心電図との同時測定を 2 回行い、測定方法による条件反応の有無の比較を行った。

6.4 結果

6.4.1 遮音室による実践水槽内の遮音効果

遮音室による実験水槽内の減衰量、音響透過損失 (0dB re 1 μ Pa) および背景雑音のスペクトルレベル (0dB re 1 μ Pa/Hz^{1/2}) を Fig.6-8 に示す。静寂時の背景雑音の音圧は、オーバーオール値で 100dB、閾値測定に使用した 50Hz~1.5kHz のスペクトルレベルは 37~65dB であった。なお 80Hz 以下でスペクトルレベルが急激に上昇することから、当水槽内の背景雑音は低周波数帯が主成分となる。遮音室による遮音効果の指標としての音響透過損失は、40Hz~315Hz で 3~9dB、それ以

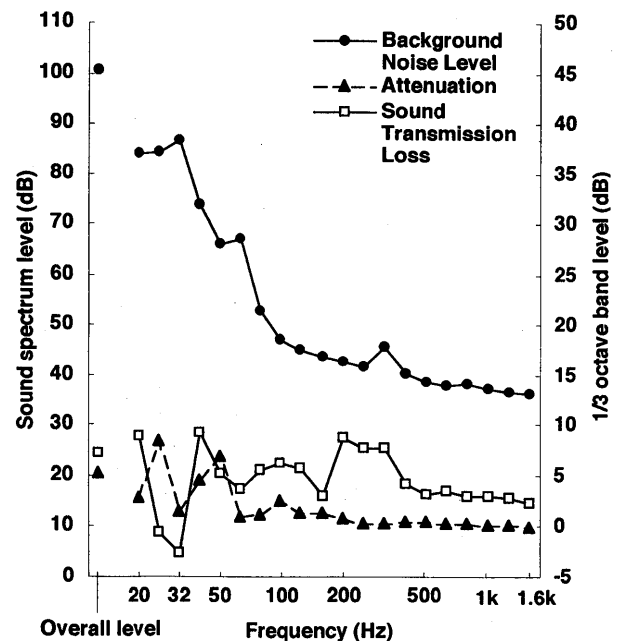


Fig. 6-8 Acoustic characteristic of water tank in acoustic chamber.

上の周波数で2.5~4dBとなった。また減衰量は、オーバーオール値で5dB、特に50Hz以下で2~8dBとなった。一般に空中では、同一原料で比較的均質な材質の材料で構成される一重構造の音響透過損失は、大部分の周波数範囲において入射音波の周波数が高くなると共に1オクターブあたり約5dBの勾配をもった直線に沿って透過損失が上昇するとされている。¹⁶⁷⁾しかし実験水槽内では水の音響インピーダンスが高いため、空中から水中への透過率が高く、空中のような高い透過損失を得ることは難しい。Fig.6-9にこれまでの実験^{61, 75, 76, 78-80)}で用いられてきた実験水槽内の背景雑音を示す。本実験の測定環境は、これまでの実験に比べほぼ同一またはそれ以上に背景雑音レベルが低い。よって遮音室内の実験水槽中では、測定に用いた50Hz以上の周波数において十分遮音効果があると言える。

6.4.2 フィルムセンサを用いた条件反応測定法の実用性の検証

ヒラメのような海底に潜砂する魚類は、砂や自らの糞、および一度排出した海水を取り込まないようにする独特の呼吸法を持つ。¹⁶⁸⁾よってここでは、呼吸による口部の水流変化から条件反応を求める方法^{156, 157)}を参考に、非挿入型のフィルムセンサを用いて鰓蓋の呼吸による開閉

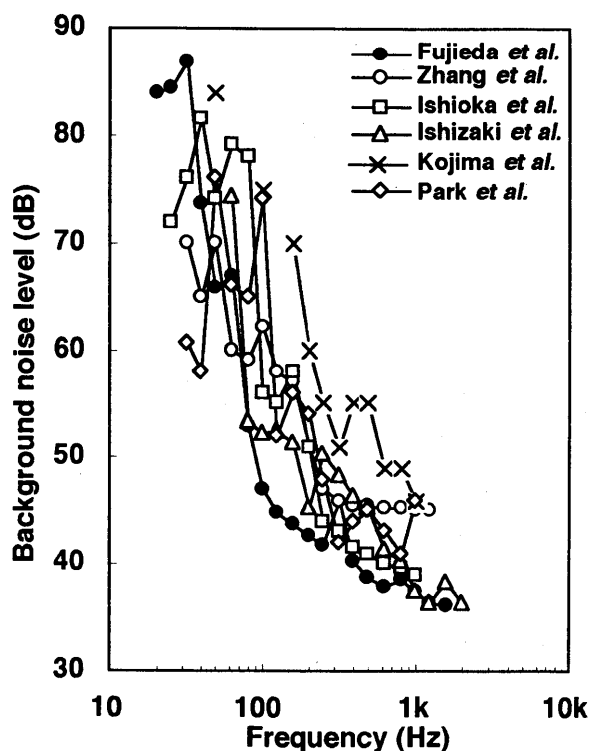


Fig. 6-9 Background noise level for measurements of auditory threshold in Japan (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$).

運動周期変化から条件反応を求める方法を探り、その実用性について検討した。

1) 検出波形

呼吸活動上での条件反応の特徴を得るために、実験Iで最小閾値となった300Hzの条件刺激(130dB)に対する条件反応を測定した。Fig.6-10は、条件付けされた供試魚の鰓蓋開閉運動をフィルムセンサによって検出した例である。上図は条件刺激のない場合の検出例で、鋭い正ピークがほぼ等振幅、等間隔で現われる。このフィルムセンサは加速度検出型のため、その出力波形は実際の鰓蓋運動の微分波形を示す。よってこの波形では、鰓蓋の動きが停止した時が振幅0、開閉運動の加速度最大時が最大値(ピーク)を示す。測定の結果、心拍間隔と同じく鰓蓋も一定周期で開閉運動を行うことがわかった。次に条件刺激を与えた時の検出例を下図に示す。条件付けを行わずに条件刺激を与えた場合、上図と同じく出力波形の振幅、周期に変化が見られなかった。しかし条件付け後に130dBの条件刺激を与えた場合、下図のように一時的に出力波形に正ピーク間隔の延長とピーク振幅の減少が生じた。これは条件反応として鰓蓋の開閉運動速度が一時的に低下して、その周期が延長する呼吸の抑圧が発生したことを示す。

またフィルムセンサと心電計の同時測定による条件反応の出力例をFig.6-11に示す。センサ出力波形のピーク間隔と心電図の心拍間隔は一致しないが、それぞれの条件反応は、心電図では心拍間隔の延長、フィルムセン

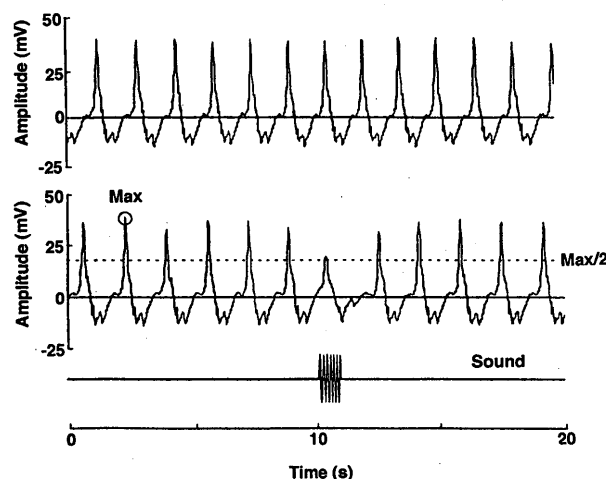


Fig. 6-10 Respiratory activity measured by the piezoelectric sensor.

Top, respiratory activity of a resting test fish; mid, respiratory activity of a conditioned test fish respond to sound projected (130 dB); Max, maximum amplitude during 10s before the sound projection.

サ検出波形では正ピーク間隔の延長と振幅の減少として検出され、放音後2~3秒で元の波形に回復した。両検出波形を比較すると、心電図のQRS波は0.15mV程度と非常に小さく、R波のみ検出が可能であったが、フィルムセンサによるピーク電圧は2.5~5mVとS/N比が大きいので、容易にデジタル信号処理することができた。またフィルムセンサでは検出信号が小さい場合、装着位置を調整することにより容易に検出信号の修正が可能であったが、電極針では一度挿入してからの修正が困難であった。さらにフィルムセンサは、体表接触型のため電極針挿入後の回復時間が不必要となり、測定時間が短縮され、装着による供試魚の死亡も見られなかった。またこの方法では、魚体を固定しないため、呼吸周期の測定に加えて条件刺激に対する逃避行動の有無も観察することができた。

2) 条件反応

よって条件刺激に対する正の反応の判定は、フィルムセンサ出力波形のピーク間隔を呼吸周期とし、放音前10秒間の平均ピーク間隔と条件刺激放音中、放音終了後第1回目のピーク間隔とを比較し、前者(平均ピーク間隔)に対し後者(2ピーク間隔)のうちいずれかに有意な差がある場合($\alpha < 0.05$)を反応有り(正の反応)と判定した。なおここで言うピークとは、Fig.6-10に示すように放音前10秒間のフィルムセンサ出力波形の振幅最大値(Max)の1/2以上の振幅ピークを示し、それ以下のものはピークとして扱わなかった。またスイープ音に対する条件反応の判定は、フィルムセンサ出力波形からスイープ開始前20秒間に比べ開始後、有意に長くなる($p < 0.05$)ピーク間隔を求め、その時の周波数から可聴周波数と非可聴周波数の境界となる知覚上限周波数を求めた。まずティラピアの20段階で増加する条件刺激に対する呼吸と心電図上の正の反応の出現をFig.6-12に示す。200Hz~1kHzの各周波数の音圧増加に対し、ある

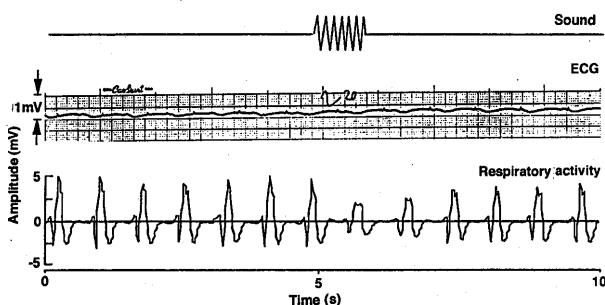


Fig. 6-11 An examples of conditioned respiratory responses in the respiratory activity and ECG recorded by simultaneous measurement.

音圧から連続的に正の反応が認められたが、それ以下の音圧でも単発的な反応は見られた。Fig.6-12の右端には、300Hzで行った呼吸と心電図の同時測定の結果も示す。これより100dB以下の低音圧において見られる単発的な反応は、呼吸または心電図どちらかの単独反応であったため、同時性を持たない正の反応をノイズとし、正の反応が連続して現われる最小音圧(最小可聴値)と、その直前に放音した音圧との中間値を負の反応から正の反応への転換点と考え、これを聴覚閾値とした。

Fig.6-13は、実験Iと実験II-1で求めた聴覚閾値を重ねて示したものである。実験II-1のフィルムセンサによって得られた閾値の範囲は、300Hzで7.5dB($n=10$)となり、実験Iの心電図から求めた19.5dB($n=9$)に比べ小さくなった。これは心電図上の反応に比べフィルムセンサによる反応には連続性があり、最小可聴値の判断が明確になったためである。

Fig.6-14は、ヒラメに条件刺激のトーンバースト音を2.5dB間隔で順次増加させて放音した場合(実験II-2)、正の反応(条件反応あり)が出現した音圧を示す。70Hz~1kHzの各周波数において正の反応が認められたが、音圧の増加に伴い連続して正の反応が現われたのは70Hzと100Hzのみで、200Hz以上では低い音圧段階で単発的な反応が見られた。特に700Hzと1kHzでは

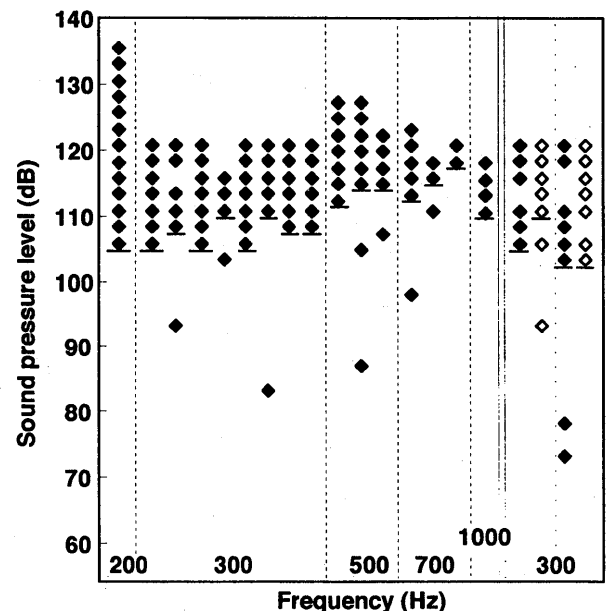


Fig. 6-12 Conditioned respiratory responses of the tilapia to sound stimuli.

◆, response in respiratory activity; the bar "—", auditory threshold. Projected sound pressure level was increased by 2.5 dB 20 times at an interval of 30 s. The right hand figure compares the response in respiratory activity "◆" and ECG "◇" at 300 Hz (0 dB re 1 μ Pa).

単発的な反応のみであった。またそれ以外の周波数における連続的な反応も、放音回数の増加により不連続になる傾向が見られた。このようにヒラメでは、反応の連続性に基づく最小可聴値の判定方法を適用することは困難であることがわかった。またヒラメはカレイと同じく無鰾魚であり、音圧変化よりも粒子変位に感度が優れ、可聴範囲も狭い。よって水槽底面から伝わる環境雑音による反応の誘発や、条件付け周波数が可聴範囲を超えたため、強化不足が生じたとも考えられる。したがって実験Ⅲのヒラメのオーディオグラムの測定では、負から正へ反応が転換する閾値音圧付近で、放音音圧を2.5dB間隔で増減させて反応の有無を確認する上下法を用い、同一音圧で2回の反応有りを示したものを最小可聴値とした。聴覚閾値は、その最小可聴値と最小可聴値-2.5dBの中央値とした。

6.4.3 オーディオグラム

1) ティラピア

ティラピアは、鰾と内耳が接続されていない非骨鰾魚に属する。実験Ⅰの閾値測定は、100Hz~1kHzの周波数に対し10尾、1.5kHzでは5尾行い、判定可能であった結果をTable 6-3に示す。ティラピアは測定に用い

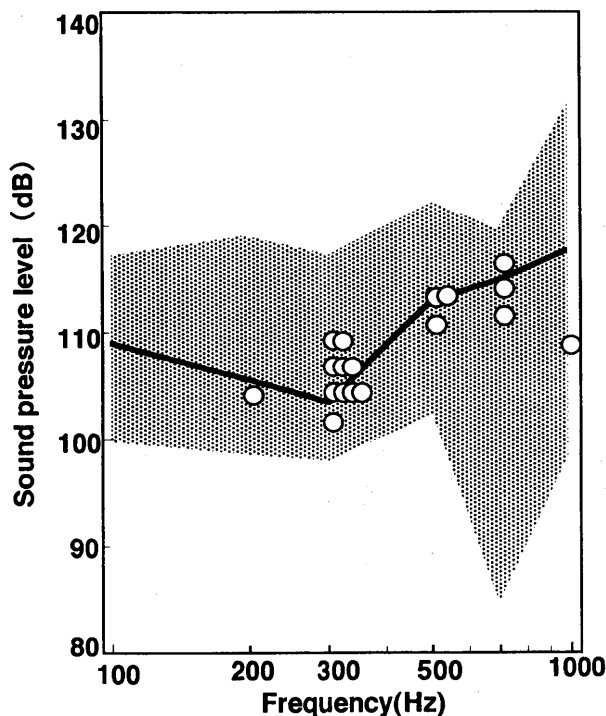


Fig. 6-13 Comparison between auditory threshold values obtained by the piezoelectric sensor "O" and an audiogram (the bold solid line) by ECG of tilapia. The dotted area indicates the range of auditory threshold by ECG (0 dB re 1 μ Pa).

た100Hz~1.5kHzの周波数の音に対し知覚可能であった。Fig. 6-15はTable 6-3の結果を散布図として示し、そのうち特に連続測定ができた4個体の個別別最小可聴値を結んだものである。この曲線の形状はすべて凹型を示したが、最小値を示す周波数は200Hz~500Hzと個体により異なる結果となった。またそれらの閾値の最大値は、2個体が700Hzにあり、1kHzで低下する傾向が認められた。各測定周波数における推定変動範囲は2.5~12dBであり、特に200Hzと300Hzでは10~12dBとなった。

Fig. 6-16に実験Ⅰで得られたティラピアのオーディオグラムを示す。オーディオグラムは各周波数で得られた結果の中央値を結ぶことにより描いた。なおこの曲線と測定周波数における背景雑音との臨界比は50dB以上であった。ティラピアのオーディオグラムは、300Hzに最大感度(103.5dB)を持つ凹型曲線を示したが、マダイ⁶⁾に比べ全体的に5~10dB高い結果となった。

2) ヒラメ

供試魚7尾の聴覚閾値と実験水槽内の環境雑音をTable 6-4に示す。各供試魚とも測定した70Hz~500Hzの各周波数において反応が認められ、測定結果は環

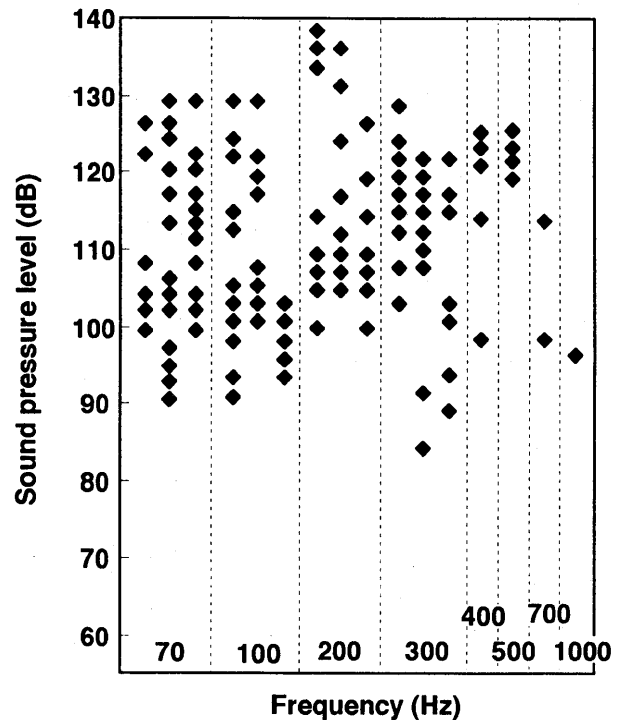


Fig. 6-14 Conditioned respiratory responses of the bastard halibut to sound stimuli. \blacklozenge , response in the respiratory activity (0 dB re 1 μ Pa).

Table 6-3 Individual auditory threshold for tilapia

Total length (cm)	Frequency(Hz)						
	100	200	300	500	700	1,000	1,500
24.0	109.0	104.0	100.5				
24.0	117.5		103.5				
19.5					110.5	132.0	
19.5	100.0			116.5	117.0	119.5	
16.0		113.5		102.0	119.5		
17.9					112.0		
18.5	107.5		100.5		110.0	116.0	
21.5		107.0	117.5	117.0		121.0	
22.0	109.0				115.0	126.0	
16.0		101.5		122.0		114.0	
22.5		100.0	113.0		85.0		
22.0	109.0					99.0	
16.0							114.5
19.0							109.5
19.0							109.5
19.0							114.5
21.0	111.5	98.4	106.0	114.0	119.5	112.5	
21.0		113.5	110.5	104.5		119.5	
17.0	114.0	119.0	98.0	109.5			
21.5	114.5	104.0	100.5	112.0	115.0	112.5	
Medium value	109.0	104.0	103.5	113.0	115.0	117.8	112.0

Thresholds in dB (0 dB re 1 μ Pa).

Table 6-4 Individual auditory threshold for bastard halibut

Fish No.	Frequency (Hz)						
	70	100	150	200	300	400	500
a	96.5* ¹	89.2	94.9	103.3	118.0	119.0	117.5
b	101.2	85.4	91.1	94.7	108.2	109.8	111.1
c	99.1	91.7	104.5	103.3	113.1	114.5	115.1
d	96.5	96.6	97.3	100.9	101.0	112.2	112.8
e	109.4	99.1	104.5	98.4	103.4	116.7	110.4
f	109.4	101.5	102.1	103.3	105.8	116.7	115.1
g	96.5	94.1	92.5	100.9	101.0	114.5	119.8
Disparity	12.9	16.1	13.4	8.6	17.0	9.2	9.4
Medium value	99.1	94.1	97.3	100.9	105.9	114.5	115.1
Background noise level	66.9* ²	47.1	43.8	42.7	45.9	40.2	38.7

*¹: Threshold in dB (0 dB re 1 μ Pa).

*²: Background noise level in dB (0 dB re 1 μ Pa/Hz^{1/2}).

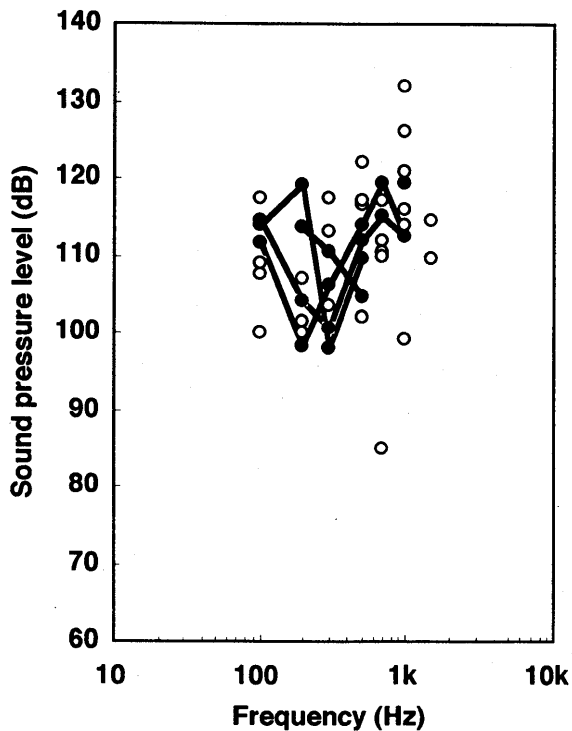


Fig. 6-15 Individual auditory thresholds (○) and audiograms (solid line) of tilapia (0 dB re 1 μ Pa).

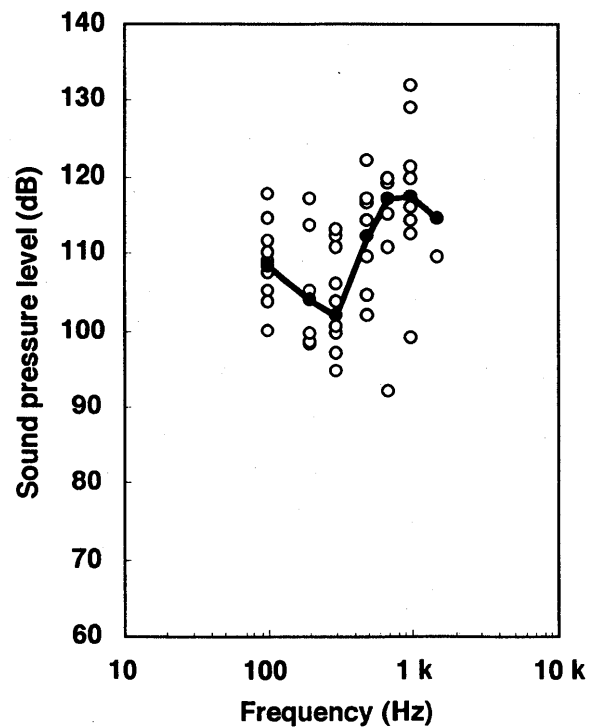


Fig. 6-16 The audiogram (solid line) of tilapia.
○, individual auditory threshold; ●, median of individual auditory thresholds (0 dB re 1 μ Pa).

境雑音よりも約 30dB 以上高いレベルであった。Fig. 6-17 に各周波数における測定結果の中央値を用いて求めたヒラメのオーディオグラムを示す。オーディオグラムは、100Hz 付近に最小閾値を持ち、200Hz~400Hz の周波数帯で急激に感度が低下し、それ以上の周波数帯では閾値がほぼ一定という特徴を持つ。各測定結果を周波数別に見ると、閾値のばらつきは 100Hz, 300Hz でそれぞれ 16.1dB, 17dB と他の周波数に比べ大きくなった。Table 6-5 に測定周波数間における閾値の変化率を示す。ヒラメのオーディオグラムは、供試魚 a~c では、

Table 6-5 Rate of increase of auditory threshold in bastard halibut

Frequency band Fish No.	100Hz~300Hz		300Hz~400Hz	
	Increase (dB)	Rate of increase (dB/octave)	Increase (dB)	Rate of increase (dB/octave)
a	28.8	17	1.0	3
b	22.8	14	1.6	5
c	21.4	13	1.4	4
d	4.4	3	11.2	34
e	4.3	3	13.3	40
f	4.3	3	10.9	33
g	6.9	4	13.5	41

Unit in dB (0 dB re 1 μ Pa).

100Hz~300Hz で 13~17dB/octave, d~g では、300Hz~400Hz で 34~41dB/octave と、300Hz 付近の周波数帯で急激に聴覚感度が低下した。さらに音響馴致実験においても、300Hz の最小可聴値は 93~110dB という大きな個体差を持つことが報告されている。⁵⁶⁾ これより 300Hz は、ヒラメにとって可聴周波数範囲の限界付近と考えられるため、閾値に個体差が生じたと推察される。また 400Hz, 500Hz では、閾値の中央値が 114dB を越え、700Hz 以上では正の反応が単発的であったことから、感度が急激に低下する周波数帯の上限にあたる 400Hz 付近がヒラメの最高可聴限と推察される。一方、100Hz でも閾値の個体差が 16.1dB と大きくなっている。本実験では粒子変位の影響を抑えた装置を用いたが、狭い実験水槽では完全にその影響を抑えることができなかったのかもしれない。

3) マアジ

マアジは、ティラピアと同じく非骨鰈魚に属する。鄭ら⁸¹⁾の資料を再検討することによって得られたマアジの聴覚閾値を Table 6-6 に、オーディオグラムを Fig. 6-18 に示す。これよりマアジは可聴周波数範囲が広く、最高感度は音源が背方向の場合、1.5kHz で 75dB, 両側

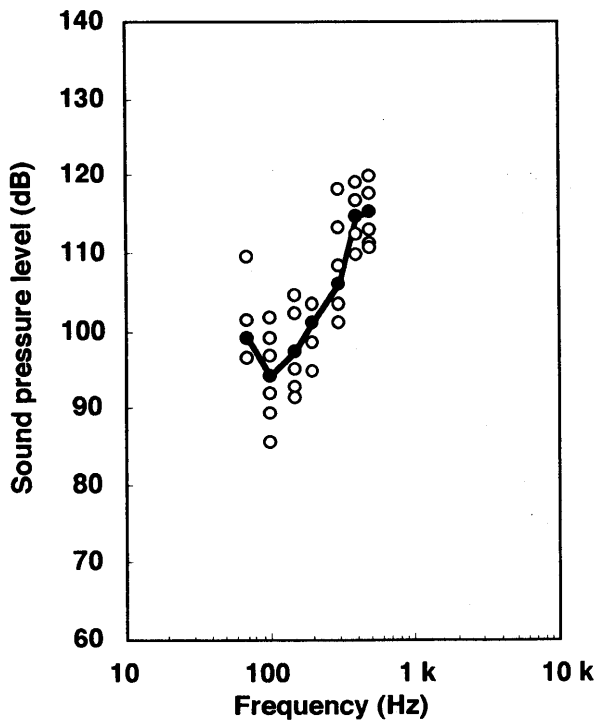


Fig. 6-17 The audiogram (solid line) of bastard halibut. ○, individual auditory threshold; ●, median of individual auditory thresholds (0 dB re 1 μ Pa).

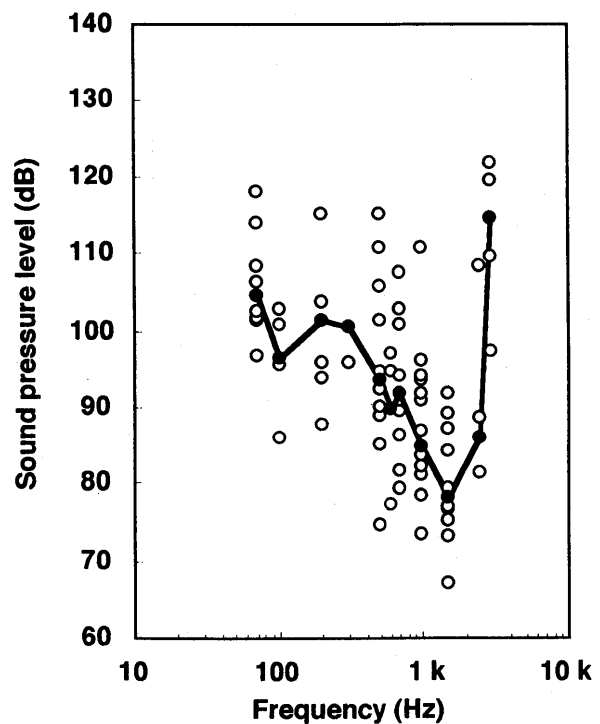


Fig. 6-18 The audiogram (solid line) of Japanese horse mackerel. ○, individual auditory threshold; ●, median of individual auditory thresholds (0 dB re 1 μ Pa).

Table 6-6 Each measuring value and medium value of auditory threshold by the sound stimulus from dorsal and lateral direction

Direction of sound stimulus	Frequency (Hz)	Auditory threshold (dB*)									Medium value	
		70	100	101.3	101.7	102.6	106.3	108.2	113.7	117.9		
from dorsal direction	70	96.7	101.3	101.7	102.6	106.3	108.2	113.7	117.9		104.5	
	100	86.0	95.4	96.5	100.8	102.9					96.5	
	200	87.5	93.8	95.7	101.2	103.5	114.9	114.9			101.2	
	300	95.8	100.4	100.4	100.4						100.4	
	500	74.6	85.1	88.9	90.0	92.3	94.6	101.4	105.6	110.5	115.0	93.4
	700	79.3	81.5	86.1	89.5	91.7	91.7	94.0	100.6	102.8	107.3	91.7
	1,000	81.0	82.2	83.7	84.6	84.6	84.6	86.9	90.9	91.7	94.1	84.6
1,500	67.0	73.0	75.0	77.0	87.0						75.0	
from lateral direction	600	77.1	77.1	89.6	94.5	97.0						89.6
	1,000	73.4	78.4	80.9	93.5	96.0						80.9
	1,500	76.7	79.2	84.1	89.2	91.7						84.2
	2,500	81.1	81.1	86.0	88.5	108.2						86.0
	3,000	97.1	109.4	114.3	119.3	121.7						114.3

*Threshold in dB (0 dB 1 μ Pa)

方向の場合、1kHzで80.9dBとなった。300Hzでは聴覚感度が100.4dBと他魚種と比較すると悪いが、500Hz～2kHzの周波数では聴覚感度が著しく良い傾向がみられた。

6.4.4 スイープ音に対するヒラメの反応

センサ出力波形に現われたヒラメのスイープ音 (600 Hz→100Hz) に対する反応例を Fig.6-19 に示す。ここでは5dB 間隔で5段階の測定すべてに対し、スイープ開始後8～15秒 (388Hz～221Hz) にピーク間隔の延長が認められた。これよりヒラメは、トーンバースト音と同じように持続音に対しても周波数が可聴域内に達すれば呼吸の抑圧が生じることがわかった。次にスイープ速度に対するスイープ開始から正の反応までの時間と知覚上限周波数の関係を Fig.6-20 に示す。これよりスイープ音に対する反応は、200Hz～400Hzの間に89%が認められ、スイープ速度が遅い場合、反応が現われる時間に個体差が大きく現われた。さらに知覚上限周波数と音圧の関係を Fig.6-21 に示す。スイープ音を用いた場合、知覚上限周波数と音圧の関係はオーディオグラムと同じ傾きを示さなかった。これはスイープ音の音圧レベルを水槽内で一定となるようなフィードバック型の放音方法⁶⁹⁾としなかったためで、そのため供試魚は周波数変化ではなく、音圧変化を感知していた可能性もある。

6.5 考察

1) 魚類のオーディオグラム

魚類の聴覚に関する研究は、主に鰾を持つ有鰾魚を中心に行われている。例えば鰾と内耳が接続されていない非骨鰾魚のティラピア⁸⁰⁾やマダイ⁶¹⁾では、その可聴周波

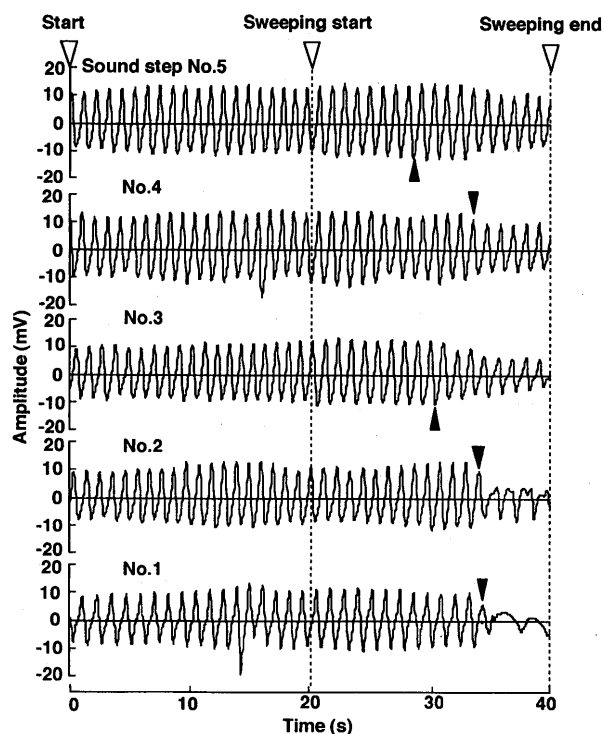


Fig. 6-19 Examples of conditioned response to sweeping sound in the respiratory activity measured by the piezoelectric sensor.

▲, response point.

数範囲が1.5kHz以下である。それに対し鰾と内耳が接続された骨鰾魚のキンギョ¹⁷⁰⁾は、可聴周波数範囲が50 Hz～5kHzと広く、最小閾値も500Hzで80dBと低い。このように聴音において高い感度と広帯域幅を有する魚は一般に聴覚スペシャリスト (hearing specialists) といわれ、音圧により発生した鰾の振動を効率良く内耳に

伝える特殊な仕組みを持つ。鰾の聴覚機能への役割に関して Chapman and Sand¹⁵²⁾ は、有鰾魚のタラ *Gadus morhua* と無鰾魚の *Pleuronectes platessa*, *Limanda limanda* を比較した結果、それらの聴覚能力の差は、タラの聴覚における鰾の補助的役割に帰するとしている。また Kojima *et al.*⁷⁵⁾ によると、サクラマス W 型となるオーディオグラムは、鰾の共振周波数の影響であるとしている。このように有鰾魚の聴覚閾値には、鰾と内耳の接続の有無やその音響特性が大きく関与している。さらにマスキングや音源探知等その他の聴覚能力についても多くの研究が行われている。^{13, 61, 77, 157, 171)} しかし鰾を持たない無鰾魚（硬骨魚類）の聴覚特性に関する詳細な

報告は、Hawkins and Johnstone による Atlantic salmon,¹⁵⁴⁾ Chapman and Sand¹⁵²⁾ による *Pleuronectes platessa* と *Limanda limanda*, および張ら⁷⁹⁾ によってマコガレイのオーディオグラムと、Karlsen and Sand¹⁵³⁾ による *Pleuronectes platessa* と Atlantic salmon の超低周波音に対する反応と少ない。Table 6-7 に海産有鰾魚 3 種と無鰾魚 4 種の聴覚特性の概要を示す。たとえば閾値が 100dB 以下の周波数範囲を無鰾魚と有鰾魚で比較すると、*Pleuronectes platessa*, *Limanda limanda*¹⁵²⁾, ヒラメおよびマコガレイ⁷⁹⁾ などの無鰾魚は、マアジ、マダイ^{61, 62)}, タラ¹⁷²⁾ およびニシン *Clupea harengus*¹⁵⁵⁾ などの有鰾魚に比べ狭いことがわかる。

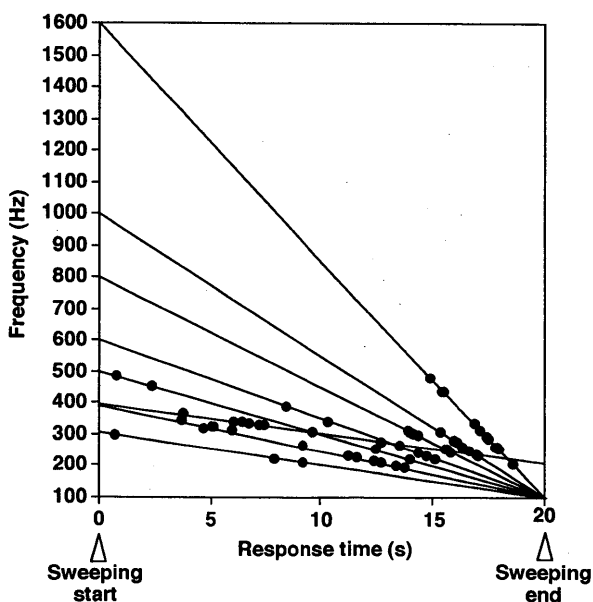


Fig. 6-20 Relation between the response time to sweeping sound and sweeping speed.
Solid lines, eight sweeping speed; ●, response time.

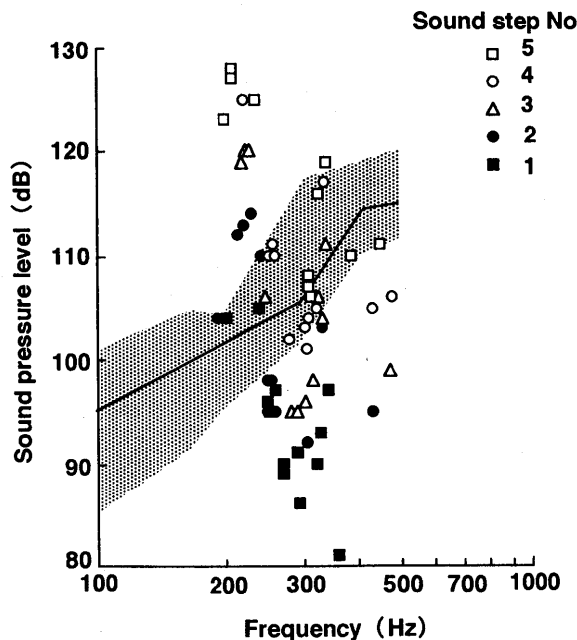


Fig. 6-21 Relation between the responded frequency and sound pressure level to sweeping sound.
Bold solid line, audiogram of bastard halibut; dotted area, range of auditory threshold (0 dB re 1 μPa).

Table 6-7 Summary of reported threshold data in marine teleosts

Species	Measurement frequency range(Hz)	Frequency range below 100dB* (Hz)	Greatest sensitivity frequency (Hz)	Reference
<i>Paralichthys olivaceus</i>	70-500	70-150	100	
<i>Pleuronectes platessa</i>	30-250	110-160	110-160	Chapman & Sand, 1974
<i>Limanda limanda</i>	30-250	110-200	110-160	Chapman & Sand, 1974
<i>Trachurus japonicus</i>	70-3000	100,500-2500	1000-1500	Chung <i>et al.</i> , 1995
<i>Pagrus major</i>	50-1000	100-500	200	Ishioka <i>et al.</i> , 1992
<i>Gadus morhua</i>	30-470	-470	60-380	Chapman & Hawkins, 1973
<i>Clupea harengus</i>	30-8000	-2000	100	Enger, 1967

*Unit in dB (0 dB re 1 μ Pa)

日本においても海産重要水産魚種について Ishioka *et al.*⁶¹⁾, Hatakeyama⁶²⁾ によるマダイの研究に始まり、現在では7魚種についてのオーディオグラムやその他の聴覚特性が求められてきた。Fig.6-21 にそのうちの6魚種のオーディオグラムを示す。各魚種の感知能力が最も優れた周波数は、マダイでは200Hz (85.8dB)⁶¹⁾, クロソイでは100Hz~200Hz (90dB)^{76, 77)}, スケトウダラでは120Hz~200Hz (97.7~100.3dB)⁷⁸⁾, マアジでは1kHz~2.5kHz (85~86dB), ヒラメでは100Hz (90dB), マコガレイでは100Hz (92.5dB)⁷⁹⁾となっている。

このように魚種により聴覚感度が異なることから、特に広帯域雑音に対しては、魚種によって異なる音色で受波し、その知覚反応も異なることが予想される。

2) 魚類の聴感補正曲線

聴感補正特性とは、騒音を測定する際に用いられる騒音計などに組み込まれている周波数補正回路(一種のフィルタ)の特性で、聴覚の周波数特性を反映させた形で音圧レベルを測定・評価するために用いられる。人間の場合、その聴覚特性を考慮した音の大きさを示す指標としてラウドネス曲線が用いられるが、これは1kHzの純音と同じ大きさに聞こえる他周波数の純音の音圧レベルを求め、それを線で結ぶことによって得られる。またその評価は、騒音レベルで示され、ラウドネス曲線に基づいて決められた聴感補正特性(A特性)によって重み付けされた音圧レベルを表す。

魚の場合、ある音圧レベルと同じ大きさに聞こえる他の周波数の音圧レベルを求めること、すなわち刺激の強弱を導き出すことは、刺激に対する反応の有無を得ることに比べ非常に難しい。ここでは300Hz音を基準音とし、魚のオーディオグラムに基づいて基準音の音圧実効値が1 μ Paである場合を0dBと決め、基準音以外の周波数では、聴感補正を行った音圧実効値が1 μ Paである場合を0dBとして聴感補正曲線を求めた。

また、異なる魚種の水騒音レベルは魚種により最高感度を示す周波数やその感度が異なるため、同一評価することはできない。ここでは魚種による受波音圧を比較するため、周波数300Hz、音圧レベル100dBを聴感補正基準音圧レベルとして各魚種の相対感度を求め、魚の聴感補正特性の魚種間補正值とした。以下この魚種間補正值を含む聴感補正特性をFish特性と呼び、このFish特性を用いて補正されたスペクトルレベルから求めたオーバーオール値を水中騒音レベルと呼ぶ。

Fig.6-22 にティラピア、ヒラメ、マアジおよび Ishioka *et al.*⁶¹⁾ が求めたマダイの4魚種のオーディオグ

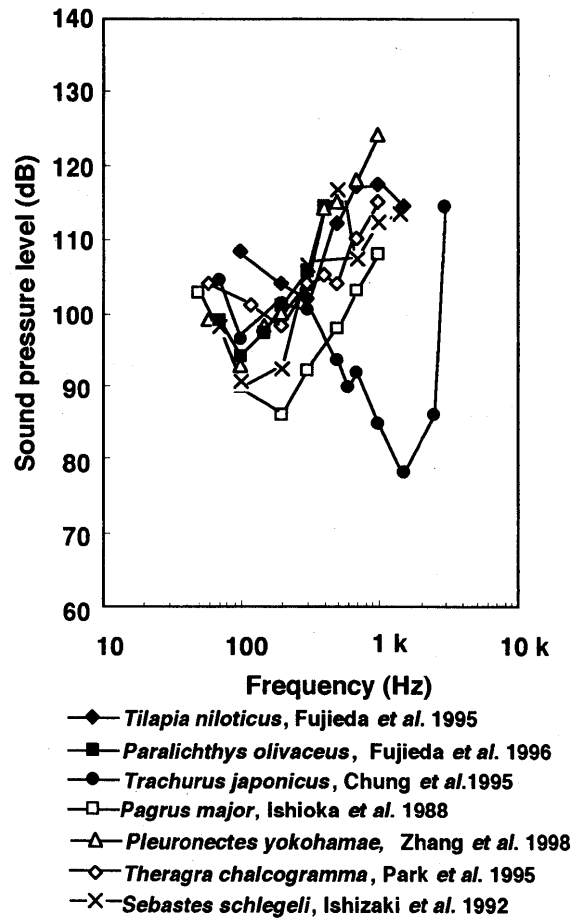


Fig. 6-22 Comparison of the audiograms of fish by recent studies (0 dB re 1 μ Pa).

ラムから、最小二乗法による2次適合によって求めたFish特性を示す。ただし超音波音¹⁷³⁾、超低周波音¹⁵³⁾についての感度は、限られた魚種でしか求められておらず、その受波機構も解明されていない。また周囲雑音が超音波閾値以上になることは魚探機や水棲哺乳類からを除いては稀であることから、ここでは考慮しなかった。

これよりヒラメが最も可聴周波数範囲が狭く、マアジがかなり広帯域で感度が良くなることが予想される。マダイとティラピアは補正曲線の形状は似ているが、魚種間補正值が17dBも異なることから、水中騒音レベルが大きく異なることが予想される。

第7章 総合考察

浅海域の10kHz以下の周囲雑音は、船舶による海中放射雑音、陸上からの人工雑音、風浪による海況雑音、生物雑音、および地域特有の自然現象による雑音が混合

されたものである。本章では、鹿児島湾の水中音環境について総合的に考察し、さらに前章で作製した聴感補正曲線を用いて魚類の水中音環境について考察した。

7.1 鹿児島湾の水中音環境

自然雑音の中でも風浪による海況雑音は、船舶放射雑音がない海域では生物雑音と共に周囲雑音の主因となる。湾奥海域において風速 6m/s 以上の測定では、200Hz～500Hz のスペクトルレベルが高く、“コー”、“シュー”と聞こえる雑音が息をするように数秒の周期で増減していた。この原因が風浪によるものか、遠方から伝搬してくる船舶放射雑音なのかは判断できないが、この現象から周囲雑音が周波数だけでなく時間的にも変動することが示された。また鹿児島湾では、海底噴気孔からの“たぎり”による地域特有の自然雑音が発生している。その発声音は、250Hz～1kHz の周波数成分が卓越するが、他の海域に比べ 5kHz 以上で低下する傾向が見られた。前者は気泡の発声音と推察されるが、後者の影響は発音生物が噴気孔周辺に存在しないためであると推察する。また“たぎり”は海面に達するとはじけ、雨が降るような光景を見せるが、その水域は限られているため、10kHz 以上の周波数成分に影響を与える降雨⁹⁸⁾とは異なるスペクトルの特徴を示す。よって鹿児島湾のような平穏な閉鎖的内湾では、自然雑音は荒天時を除けば魚類の水中音環境にほとんど影響しないと推察する。

沿岸域における生物雑音は、海岸の固着生物ではなく、主にテッポウエビ等の生物によるもので、¹¹¹⁻¹¹⁴⁾その発声音は 7kHz 以上に及ぶ。¹¹⁵⁾鹿児島湾奥海域では、ハイドロホン深さが増すにつれて 5kHz 以上の周波数成分が増加したが、これは海底からの生物雑音の影響であると推察される。またその時間的季節的変動は、雑音源となる生物活動と大きく関係する。一方魚群内では、遊泳する個々の魚から体の動きに伴った遊泳音が発生する。これは極めて微弱で観測が難しいが、その卓越周波数は魚の可聴周波数範囲内に存在し、群れを形成する種では個々の遊泳音が合成されて容易に知覚できるほどの大きさになる。魚類の中にはスケトウダラのように、聴覚の最も優れた周波数に主成分を持つ音を求愛音として積極的に利用している魚種もいる。^{105, 106)}竹村¹⁰⁹⁾は、魚は相互に相手の発している音情報を利用して生活していると考えるのが妥当であると述べている。しかし遊泳音や摂餌音の音圧レベルは、例えば Kaparang *et al.*¹⁰⁾によるとそれぞれ 102.8～116dB, 113.4～124.8dB と低いため、その影響範囲は主として魚群内のみで、周囲雑音への影響は低いと考えられる。

一方、浅海沿岸域における周囲雑音の主な変動要因には、船舶からの海中放射雑音が挙げられる。特に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は、スペクトルレベルが高いため、接近に伴って音圧レベルが上昇し始める 0.3 海里よりも遠くから確認できる。柴田ら²⁹⁾によると線スペクトル成分が顕著な船では漁獲効率が悪いとしているが、⁴⁾その周波数特性は、同一船舶においても主機回転数やプロペラ回転数によって変化する。またその航走雑音は、音源と受波者の距離変化に加え、海中の伝搬条件によっても異なるため、漁獲効率が悪い原因は単に瞬間のスペクトル成分や音圧上昇のみで示されるものではない。特に浅海域において船舶のような広帯域雑音源が接近してくる場合、音源から直接伝搬してくる直接波と海底・海面で反射した間接波が干渉するため、スペクトログラム上にはピーク周波数が低周波側に緩やかにスweepする縞模様が見られる。これは周波数が高いほど位相変化周期が短いため放射状の模様となり、測定海域の水深や反射回数によってその模様の強弱が異なる。これを単一周波数で見ると、音波が接近するにしたがってスペクトルレベルが大きく変動しながら増加する現象となる。またこの変動を鉛直方向に見てみると海面近くでは、位相が逆転した海面反射波と直接波が負の干渉を生じ、スペクトルレベルが直接波より 3dB 低くなる。一方中層では正、負の干渉が生じ、特に負の干渉が顕著で低周波音ほど近距離で生じる。特にこの現象は、魚の聴覚閾値付近でかつ接近に伴って音圧レベルが上昇し始める距離において生じることに注意しなければならない。王⁹⁹⁾によるとキンギョを用いた実験では、持続音よりも断続音の方が知覚されやすいとしている。よって近距離で干渉による急激な音圧レベルの変動が生じる浅海域では、単なる伝搬距離変化によって音圧レベルが上昇する深海域に比べ、魚は移動する音源を知覚しやすくなるを考える。またこれらの干渉効果は、音源が移動する場合に限らず、受波者が音源に向かって鉛直および垂直移動する場合にも生じる。例えば、1kHz 付近の比較的高い周波数に感度が優れるマアジ⁹¹⁾は、わずかな鉛直移動によりスペクトルレベルが変化する水深を遊泳していることになる。一方、停泊中の船舶から放射される海中雑音も海底面から上方 10m 付近までに干渉現象が生じる。特に音源直下の海底に潜砂するヒラメは、すべての周波数で正の干渉の影響を受けることになる。また遠方から伝搬してくる海中放射雑音は、海底地形や海域特有の音速プロファイルにしたがって伝搬するため、さらに水中音環境は複雑となる。よって浅海域における海中での音響利用には、その

海域の音波の伝搬特性について考慮していく必要がある。

また船舶交通量の多い港湾域では、後進発令による海中雑音の発生や、高速船による音圧の急増、音源の直上通過による大音圧、および浅海域特有の干渉などの現象が頻繁に生じ、船舶交通量によって水中音環境は時間的に変化した。また南星丸を例とすると、Fig. 4-13より船舶が受波者直上10mを通過した場合、音圧レベルは約160dBに達し、最接近距離が0.1海里以内では、最高音圧が140dBを越える。よって鹿児島港周辺海域の船舶通航密度が特に高い2通航帯の合流・交差部では、水中音圧が1日に140dB以上に達する頻度が45回を超えると推察される。特にFig. 2-13に示すようにHH'線上では、小型ボートや漁船の海中放射雑音を含めると日中、約5分に一度威嚇レベルに達していると考えられる。また桜島水道付近のように海面養殖などの漁業が盛んに行われている海域では、小型漁船の交通量が多く、同じく騒々しい海域と言える。魚は140~160dBの音圧レベルで逃避行動を生じるという報告⁴³⁾があることから、大音圧の発生は、前述した急激な音圧レベル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。

さらに沿岸部では、工場雑音、工事雑音および陸上交通雑音などの陸上からの人工雑音の影響を受ける。しかしその放射雑音は、船舶の海中放射雑音の周波数帯と重複することから、船舶雑音が支配的な海域では陸上からの人工雑音の影響は低い。船舶航走雑音も含めたこれらの人工雑音は、人間活動によって発生するため、水中音環境へ与える影響はその活動が活発な日中に大きくなるが、陸上雑音の影響は橋などの雑音を海中に伝達する構造物がない限り海岸附近に限られる。

よって鹿児島湾のような海面が穏やかで陸上騒音源のない半閉鎖的内湾での海中雑音の変動は、陸上騒音や海況雑音による影響よりも、海底からの生物雑音や船舶の海中放射雑音の有無、およびその伝搬条件の変化などに影響されるといえる。言い換えれば、人工雑音がない海域、または本来の自然環境下、あるいはそのような人工雑音源がなかった時代には、急激な変化を伴う海中雑音は、存在しなかったと言えよう。このように浅海沿岸域の周囲雑音は、個々の雑音背景の音響特性だけでなく、主雑音源となる海況雑音や生物雑音および人工雑音の時刻、季節、水域による変化の影響を受けている。

これまで収録解析されてきた他の海域の周囲雑音には、船舶放射雑音の影響により夏季の東京湾南部の周囲雑音レベルは、沖合いに行くにしたがい低下した。¹⁶⁾ また魚群の遊泳音を含む空間的に様々な雑音源が集合している

人工魚礁、¹³⁶⁾ 養殖生簀内、^{1-3, 5, 10)} 定置網^{6, 18)} などの海中構造物付近での収録が行われてきた。しかしそれらは、時間的・空間的に“点”あるいは“点の連続”という収録方法のため、時間的・空間的にわずかつつ変化する水中音環境の特徴を十分にとらえることはできていない。よって今後、これまで述べてきた水中音環境の特徴を得るには、従来の“点”による収録、スペクトル解析という時間軸または空間軸を持たない2次元解析から、それらを含むスペクトログラムとして3次元解析が可能な収録を行っていく必要がある。

また水中音環境を受波者側である魚から見ると、魚種によって聴覚感度が異なることや受波者が移動するため、空間的に水中音環境が異なることを考慮しなければならない。次に魚類の聴覚特性からみた水中音環境について考慮する。

7.2 魚類の聴覚特性からみた水中音環境

魚にとっての水中音環境とは、魚各々の聴覚感度で受波したすべての雑音背景によって構成される水中での音響環境を指す。魚類の可聴周波数範囲内でこれまで測定された海中雑音を見ていくと、魚が積極的にそれらの音を利用してなくとも、刺激の一つとして常に曝されている環境要因であることがわかる。よって魚にとって「望ましくない音」は騒音となる。例えばこの騒音となるものには、魚間の信号伝達や生活に障害や苦痛を与えたりする発破音や船舶放射雑音などがあり、静穏な生活を乱す可能性がある点で音圧の大きい音はおおむねこれに相当する。Schellart and Popper⁹⁰⁾は、魚種による周囲雑音の影響について、周波数 f における聴覚閾値 S_f と臨界帯域幅 B_{3dB} から周囲雑音に対する理論的感度 T_s を次の(27)式から求め、Wenzが求めた風力階級による周囲雑音レベル¹⁷⁴⁾と比較した。

$$T_s = S_f - 20 \text{Log} B_{3dB, f}^{1/2} \quad (27)$$

なお f は中心周波数を示す。その結果、タラは、風力階級(ビューフォート階級)3で300Hzまでの周囲雑音を可聴し、Atlantic salmonは、風力階級7以上にならないと周囲雑音を聞くことができないとしている。

海中放射雑音に対する魚の行動については、柴田²⁹⁾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³⁴⁾によると、船から放射される130dB~150dBの水中音は魚を驚かせ、その放射直後に魚を数m沈下させた。肥後³⁷⁾は、スチームトローラーとディーゼルトローラーの漁獲差を統計資料を用いて比較

した結果、スチームトラローラーが明らかに漁獲量が大きく、その原因は船舶から放射される雑音の影響であるとされている。また漁具音については、トロール漁法は、2そう曳き漁法や1そう曳き漁法に比べオッターボードの音響効果による駆集効果が加わるため優れている。²²⁾ 不破ら¹⁷⁾は、伝統漁法のタイ縛り網では振木やロープおよび重りが音を発し、魚を威嚇して集魚しているのではないかと指摘している。石岡ら⁴⁷⁾によると、マダイは音圧が増加するほど行動攪乱の起こる割合が増加し、200 Hz音に対し最も敏感に反応した。摂餌行動も高い音圧や200Hzで抑制的影響を受けたが、威嚇されたときのような敏感な反応は見られず、100~400msの放音時間では魚の行動に変化は生じなかった。畠山⁴⁶⁾によると、マダイは0.1kg発破では摂餌、遊泳状態に変化はなかったが、1kg発破では瞬間的に方向性なく散逸し、あまり深くは潜らずに2~3分で発破前の状態に回復した。しかし55kg発破では散逸が大きく、回復には3~4分要した。また添田ら¹⁶⁾によると、静穏な湾内の海中生簀で生育したマダイに比べ曝気装置などの騒音が比較的大きい環境で生育したマダイは、オーディオグラムが平坦

となった。以上のように海中放射雑音は、魚の行動に影響を与えるだけでなく、魚の生理にも影響を与える。よってここでは自然界で魚がどの程度の騒音にさらされているかを知る一つの試みとして、魚種別の聴感補正特性 (Fish 特性) によって補正された周囲雑音から魚種別の水中音環境について比較した。

広帯域雑音 この聴感補正曲線を用いて、ヒラメ、マダイ、マアジが聞いていると予想される広帯域雑音について、ここでは船舶航走雑音を例に比較する。Fig.7-1~3に未補正のスペクトログラムと各魚種のFish特性によって補正されたスペクトログラム、および水中騒音レベルの変化を示す。

マダイは、200Hz~400Hzにおける聴覚感度が4dB/octaveと緩やかに低下するため、Fig.7-1に示すように80dB以上に達する周波数は、遠方では500Hz以下であるが、最接近時には1kHz付近にまで達し、音源の接近に伴い可聴周波数範囲が高周波側に拡大する。ヒラメは、200Hz~400Hzにおける聴覚感度の低下が14dB/octaveと急激に低下するため、Fig.7-2に示すように300Hz以下の狭帯域のスペクトルレベルが変動するのみ

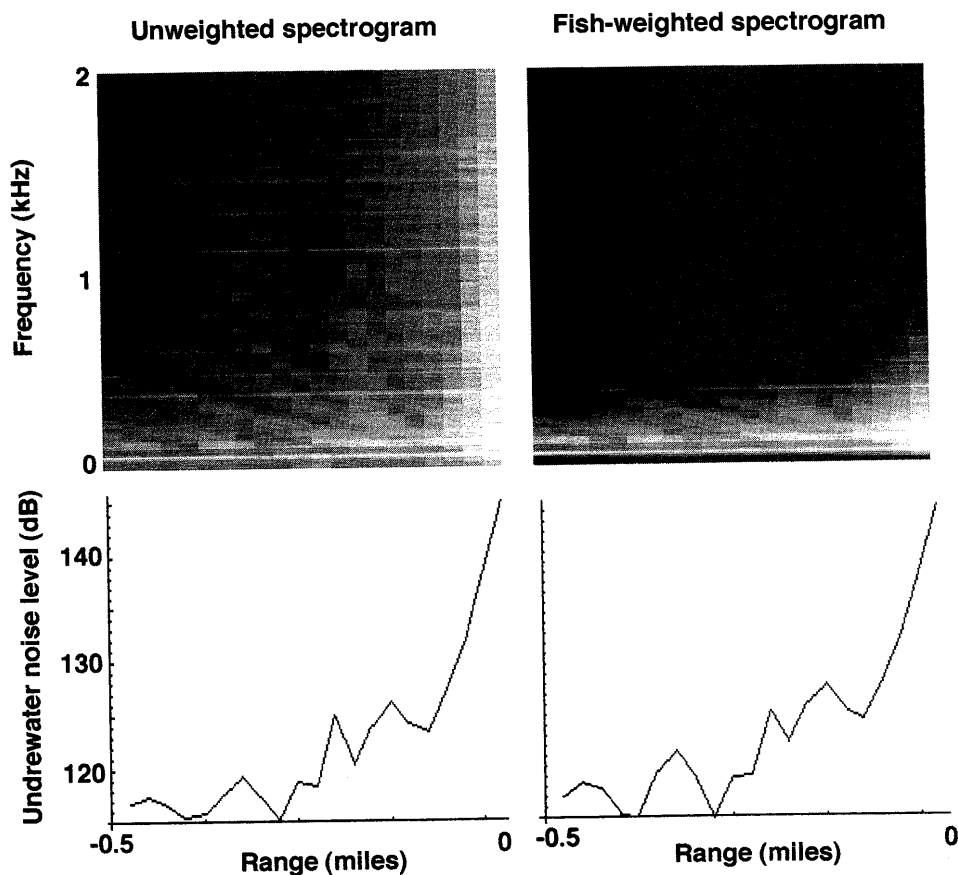


Fig. 7-1 Fish-weighting characteristic of bastard halibut for underwater noise emitted by cruising vessel. Spectrogram data, Fig. 3-2, C; d=24 m; h=24 m (0 dB re 1 μ Pa).

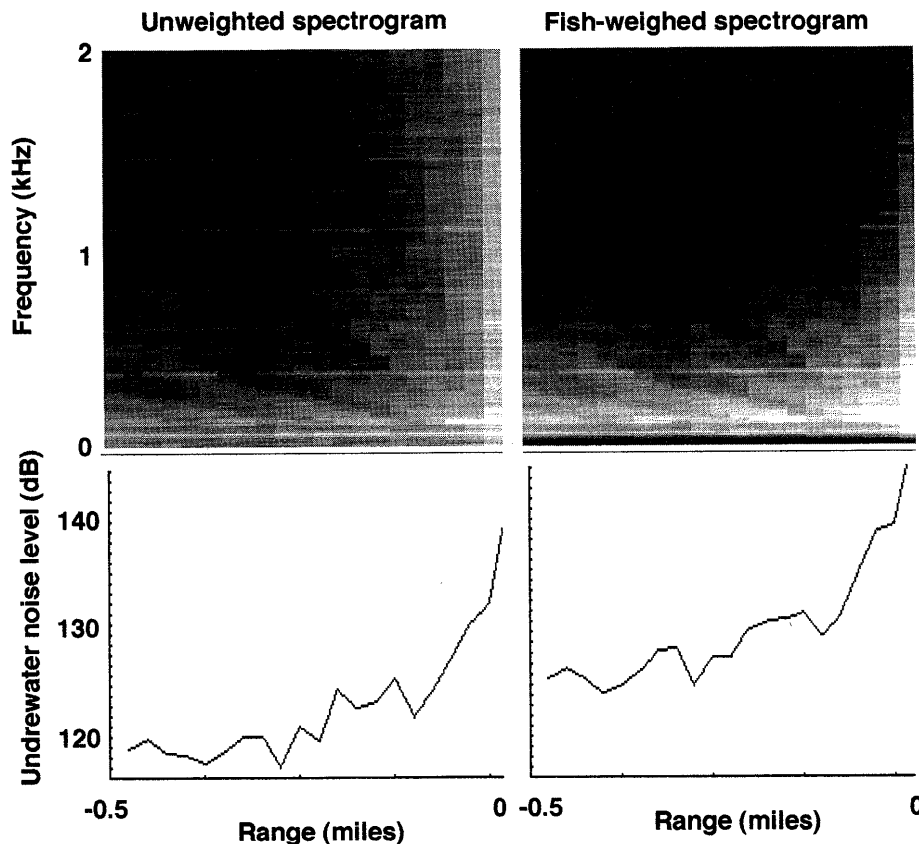


Fig. 7-2 Fish-weighting characteristic of red sea bream for underwater noise emitted by cruising vessel. Spectrogram data, Fig. 3-2, C; d=24 m; h=20 m (0 dB re 1μ Pa).

で、音源の接近に伴う周波数帯域幅の拡大はほとんど認められない。一方マアジは、1kHz～2 kHzの高周波域の感度が良いため、Fig. 7-3に示すように干渉模様が高周波域の広帯域で認められる。また水中騒音レベルは、マダイ (Fig. 7-1) では他魚種に比べ高く、未補正時の増減傾向と異なった傾向を示し、ヒラメ (Fig. 7-2) では0.25～0.5海里での増減が未補正時に比べ大きくなる。マアジ (Fig. 7-3) では干渉模様は高周波まで明確に認められるようになるが、騒音レベルの増減は未補正時に比べ小さく、また-0.1からの騒音レベルの上昇率も低く、緩やかな上昇となる。Fig. 7-4に船舶航走雑音による同一条件下 (Fig. 4-1; C点, 水深24m, ハイドロホン深さ20m) のヒラメとマダイの騒音レベル変化を比較した。ヒラメに比べマダイは300Hzにおける聴覚感度が良いため、全体的に騒音レベルは高くなるが、ヒラメは強い線スペクトル成分が含まれる低周波域の干渉現象の影響を強く受けるため、水中騒音レベルの増減幅が大きくなる。このように浅海域の水中音環境の伝搬特性による高帯域での干渉模様の鮮明さと水中騒音レベルの変動は、反する結果となった。

よってヒラメのように低周波狭帯域の聴覚特性を持つ魚の浅海域における水中音環境は、周波数範囲は狭いが、浅海域特有の低周波域の干渉の影響を強く受けるため、音圧レベルの変動を強調して受波することになる。またマアジのように高周波広帯域の聴覚特性を持つ魚の浅海域における水中音環境は、広帯域雑音の干渉による音色の変化を広い周波数範囲で受波するため、水中騒音レベルの変動は小さくなる。さらにマダイのように聴覚感度が緩やかに低下する魚の水中音環境は、広帯域雑音に対し、音圧の上昇に伴い可聴周波数範囲が広がることから、水中騒音レベルも音源付近では急増することになる。

このように魚は広帯域雑音に対し、特定の周波数帯を強調して可聴しているため、浅海域のような特殊な伝搬条件下では、球面拡散減衰とは異なる音圧変化が生じ、さらにそれ以外にも音色の変化を可聴していることが推測される。またこのFish特性は、魚の成長段階によっても変化し、^{48, 181-183)} また水温や酸素圧という環境条件によっても聴覚神経繊維のスパイク発射が変化することから、¹⁸⁴⁾ 魚にとっての水中音環境はさらに複雑なものとなる。

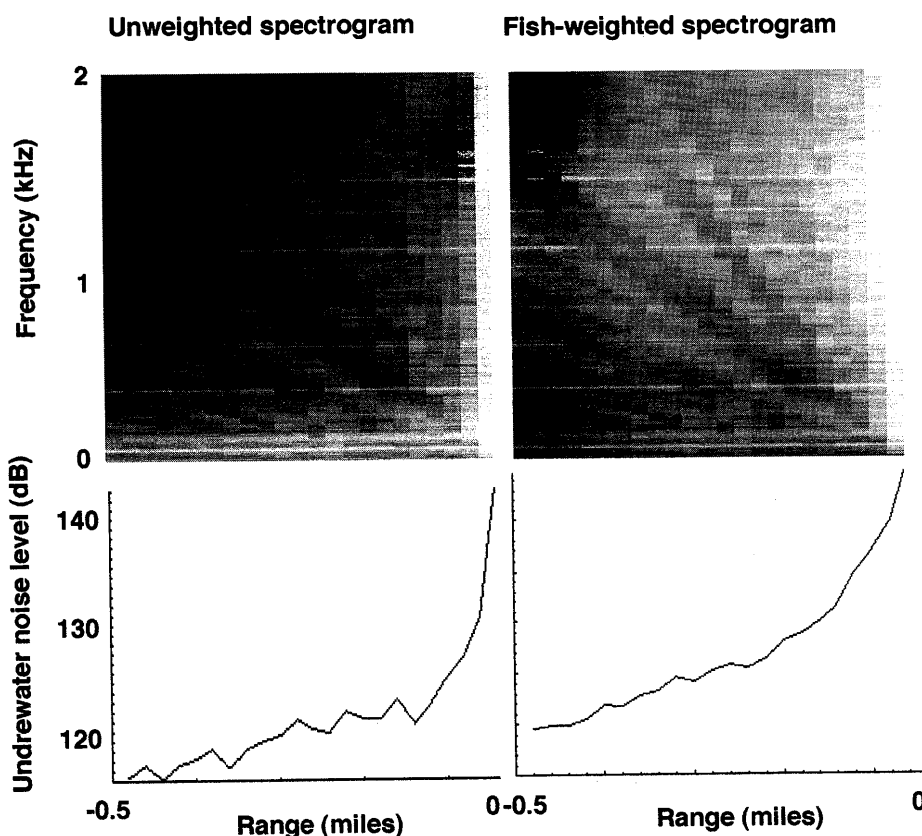


Fig. 7-3 Fish-weighting characteristic of Japanese horse mackerel for underwater noise emitted by cruising vessel.
Spectrogram data, Fig. 3-1, C; d=24 m; h=15 m (0 dB re 1 μ Pa).

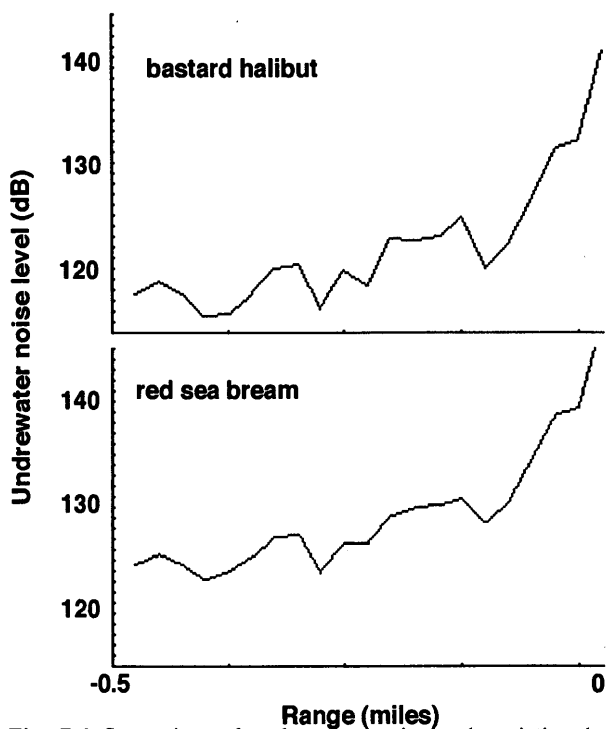


Fig. 7-4 Comparison of underwater noise level variation by frequency weighting characteristics for auditory sensation of bastard halibut and red sea bream.
Sound data, C (Fig. 4-2); d=24 m; h=20 m (0 dB re 1 μ Pa).

狭帯域音 次に干渉による単一周波数信号のような狭帯域音の音圧レベル変化について述べる。Fig. 7-5は、伝搬距離による球面拡散減衰曲線と(26)式より求めた300Hz純音の干渉による理論的音圧変化曲線、およびA点で実測された船舶航走雑音の300Hzのスペクトルレベル変化の三者を比較したものである。例えば300Hzの純音を海面付近の水中から放射した場合、底質が砂($\mu=0.5$)で受波者の水深を20mとすると0.2海里以遠では、理論値は拡散減衰曲線に比べ約5dB高く、0.2~0.3海里の範囲では逆に約5dB低くなる。このような音圧レベルの変動は、船舶航走雑音の300Hzのスペクトルレベルにおいても同様に見られた。この0.2~0.3海里の距離は、水深24mの海域において最初に負の干渉が生じる距離にあたり、これより接近すると伝搬距離差が波長の1/2になる度に負の干渉が生じる。よって魚の聴覚閾値となる90dB付近で負の干渉が生じる距離では、わずかな条件の違いで知覚の有無が変わることに注目しなければならない。例えばこのような現象は、単一周波数の人工音を用いる浅海域の音響馴致に生じることが予想される。Chapman and Johnstone¹⁷⁷⁾と Hawkins and Sand¹⁷⁸⁾は、それぞれタラの水平方向および

鉛直方向の音源定位能力について調べた。その結果、水平面における2つの音源を弁別するために必要な音圧は、音源間の角度が $40^\circ \sim 20^\circ$ に減少すると急激に増加し、 20° が角度弁別の限界であることを示している。また同じく垂直面では、仰角が $27^\circ \sim 16^\circ$ に減少すると急激に増加し、 16° が限界であることを示している。よって音源が魚に接近してくる場合、遠方では音圧が低いいため、おおまかな音源方向しか弁別できないが、接近するにつれ音圧が上昇し、音源定位の誤差も小さくなる。また Shuijf and Hawkins¹⁷⁹⁾は、水深25m~30mの海域でタ

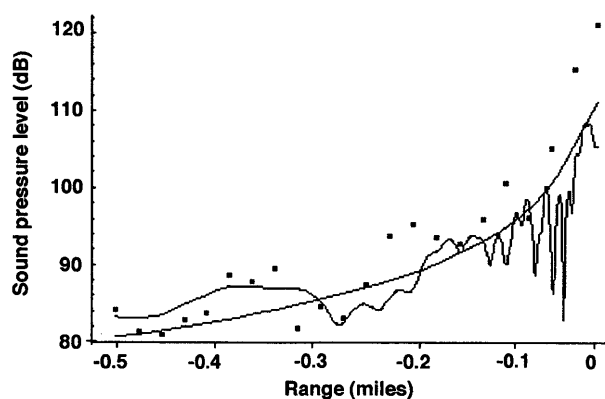


Fig. 7-5 Comparison of 300 Hz spectrum level of cruising noise ■ and 300 Hz sound pressure level calculated by Eq. (26).

Initial level of calculation, 150 dB (0 dB re $1 \mu \text{Pa} / \text{Hz}^{1/2}$); $\mu = 0.5$; $d = 24 \text{ m}$; $h = 20 \text{ m}$; $r = 10 \text{ m}$; $c = 1500 \text{ m/s}$; exponential curve, spherical spreading propagation with equation $(150 - 20 \text{ Log}_{10} d_0)$.

ラの音源距離の弁別実験を行い、音源との距離が1.3mと4.5m、4.5mと7.7mの弁別が可能であったとしている。さらに Fay¹⁸⁰⁾は、キンギョの音の強さの弁別閾と信号の持続時間について音圧の増加と減少の2方向で測定し、ホワイトノイズの場合、増加時の方が弁別閾は小さく、持続時間に対する変化率も小さいことを示している。しかしこれらは音源との距離や音源方向を感知する上で重要な聴覚機能であるが、実際浅海域で魚が移動する場合、干渉によって接近に伴い音圧が大きく変動するため、この能力も十分に発揮できるか疑問である。このように水中音環境は魚の聴覚機能以上に複雑であると言える。

また単一周波数音波の干渉効果は、船舶の接近のような音源が移動する場合に限らず、停止している音源に対し、魚などの受波者が移動する場合にも観測される。Fig. 7-6に(9)式を用いて計算した干渉による100Hz, 200Hzおよび315Hzを中心周波数とした1/3オクターブバンドレベルの増減量を比較した。魚が海底にいる場合、音圧レベルは全周波数において球面拡散減衰値より増加し、例えば海底が反射しやすい砂の場合($\mu = 0.5$)、水深26mの海域では約4dBの増加となる。また海底付近では、スペクトルレベルが増減する遊泳層の幅は低周波域ほど広がる。以上より、浅海域の海底付近では受波者である魚が船舶のような表層音源に向かって移動する場合、水平移動よりも鉛直移動の方が干渉によるスペクトルレベルの変化が激しくなると言える。一方水面付

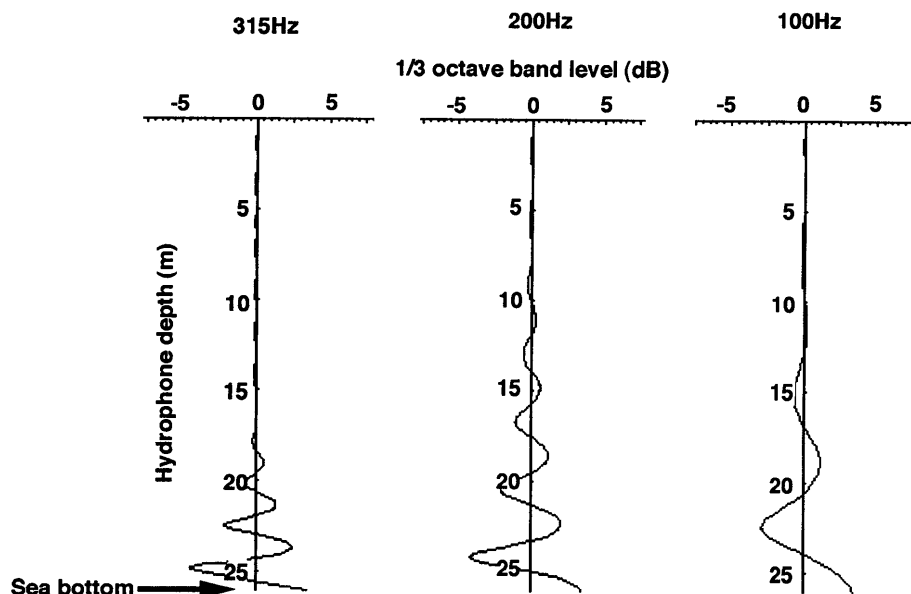


Fig. 7-6 Comparison of interference level calculated by Eq. (9).

Interference level, 1/3 octave band level; frequency, center frequency of each 1/3 octave band; $\mu = 0.5$; $d = 26 \text{ m}$, $c = 1500 \text{ m/s}$ (0 dB re $1 \mu \text{Pa}$).

近で水平移動する場合、海面反射波が直接波と位相が逆転するため、両者の干渉により音圧が低くなり、海中放射雑音の影響が低くなる。

スイープ音 これまで鹿児島湾において種々の条件で水中音環境を測定してきたが、単一周波数のスイープ音は観測されなかった。しかし接近してくる船舶から放射される海中雑音や停泊中の船舶から放射される海中雑音には、干渉模様として複数のピーク周波数がスイープする現象が認められた。特に可聴周波数範囲が狭いヒラメは、スイープ音に対し聴覚感度が急激に低下する周波数帯の250Hz付近で知覚反応を示し、特にスイープ速度が早いほど、反応が集中する傾向を示した。よってヒラメは、低周波域で特徴的な干渉現象を強調して聞こえることになる。Fig.7-7は、Fish特性（ヒラメ）を用いて、水深25m、ハイドロホン深さ25m、周波数範囲400Hz以下におけるホワイトノイズ音源が水面を移動し、ハイドロホン直上に接近してくる場合のスペクトログラムと水中騒音レベル変化を(26)式より求めたものである。これよりヒラメは、浅海域において接近してくる広帯域雑音を100Hz~200Hzの狭帯域スイープ音として可

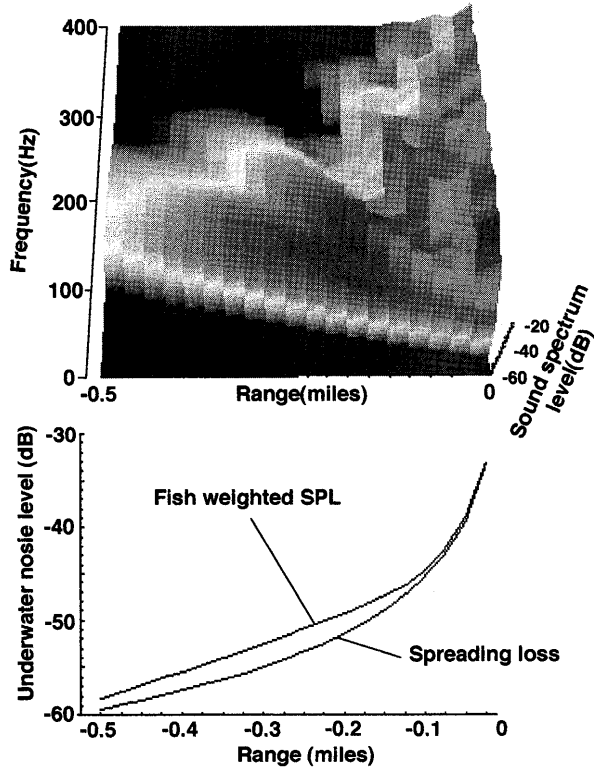


Fig. 7-7 Fish (bastard halibut) weighted spectrogram and underwater noise level variations by broad band noise in shallow water.

All initial spectrum level, 0 dB (0 dB re 1 μ Pa/Hz^{1/2}); $\mu = 0.5$; $d = 25$ m, $r = 18$ m; $c = 1500$ m/s.

聴していることになる。またその水中騒音レベル変化も、Fish特性が干渉を強調することによって0.2~0.4海里では球面拡散減衰量より2~3dB高くなる。このようにFish特性を用いた場合、浅海域では音源の接近に伴う音圧レベルの上昇だけでなく、スイープ現象が強調されていることから、浅海域で魚の威嚇・誘引などの制御に水中音を利用する場合、魚類の聴覚特性以外にも、浅海特有の干渉条件による干渉現象を考慮し、さらに魚の聴聞補正特性を用いてそれらを総合して考察する必要があると考える。ただしヒラメのスイープ音に対する閾値は、オーディオグラムのような明確なものではなかった。よってこの特性のみによって音を知覚するのではなく、様々な受波能力により可聴していると考えるのが良いだろう。

パルス音 水中音環境には、広帯域雑音以外にもテンプラノイズや遊泳音のようなパルス音の生物雑が存在する。例えばテンプラノイズは持続時間10ms、周波数1kHz以上のパルス音で音圧も大きく、遊泳音は持続時間64~250ms、周波数50Hz~100Hzのパルス音である。Fig.7-8に与次郎ヶ浜で測定した周囲雑音スペクトルの日周変化をマダイのFish特性を用いて表示した。これよりマダイのFish特性を用いた場合、テンプラノイズによる1kHz以上の影響が低いことがわかる。逆に沿岸域では、陸上雑音の影響が水中音環境の日周変化に影響を与えていることもわかる。ただし陸上雑音の影響は海岸附近に限られることから、船舶放射雑音のない自然の海中ではマダイの水中音環境は一日で大きな変化がないと推察される。

一方、魚群内では自己の遊泳音が発生する。ただし遊泳音の音圧レベルは110dB以下と低いため、広域への

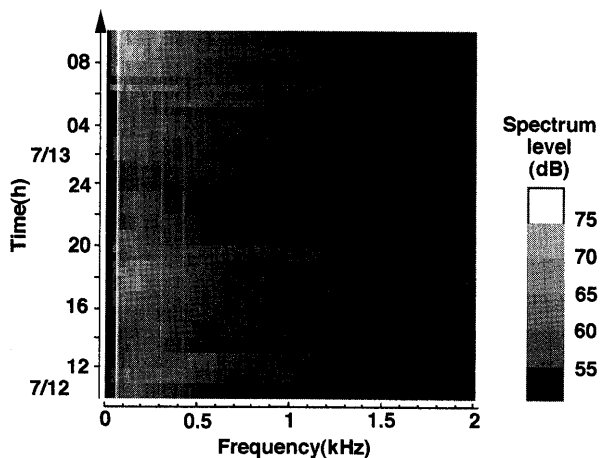


Fig. 7-8 Fish (red sea bream) weighted sound spectrogram of underwater noise for diurnal variation off Yojirou-ga-hama (Fig. 2-1, G) (0 dB re 1 μ Pa/Hz^{1/2}).

影響はないと考えるが、自らの聴覚能力をマスクする可能性は十分ある。例えばマダイ遊泳音の卓越周波数は100Hzで、聴覚特性の最も優れた周波数200Hz⁶¹⁾よりも低周波側がマスクされているにすぎない。また魚群内という近距離での音情報の伝達には粒子変位が利用されていることを示唆しているが、ここではハイドロホンの感度が10Hzまでのため、また音圧感知型のハイドロホンのため粒子変位は測定できず、その影響については考察できない。

以上のように魚類にとっての水中音環境や音響に対する集魚、威嚇効果の解明には、音源の特徴や魚類の聴覚特性などの個々の特徴だけでなく、それらに海域独自の伝搬特性を総合して考察していく必要がある。また周囲雑音は、音源も多く時間的空間的にまだ不明な点が多い。今後、さらに多くの海域で様々な測定を続け、魚類の水中音環境を解明していく予定である。さらに今後の水中音環境に関する研究の課題は、水中騒音の行動や生理に与える影響はもちろんのこと、伝搬特性による海中雑音の変化で魚がどのような行動をとるのか検証して行くことも必要であろう。

第8章 結 論

浅海沿岸域の水中音環境は、外洋とは異なり、海域特有の雑音、船舶雑音、生物雑音、工事雑音および陸上交通雑音などの雑音背景の影響により、音響的だけでなく時間的空間的に複雑に変化する。本研究では、半閉鎖的内湾である鹿児島湾において海域別雑音、船舶放射雑音、生簀内魚群遊泳音などの魚を取り巻く周囲雑音を種々の条件で収録し、その特徴と魚類の聴覚特性からみた水中音環境について検討することを目的とした。

浅海沿岸域の水中音環境は、生物雑音と人間活動によって発生する人工雑音の影響を受けて日周変化し、その中でも船舶から放射される海中雑音の影響が大きい。湾奥部海域の周囲雑音の地域特性は、漁船通過による影響以外、比較的静かな海域であった。海底噴気孔からの気泡“たざり”が水中を上昇する海域では、200Hz~500Hzの低周波成分が強く、5kHz以上の高周波成分は他海域より弱い。沿岸域での生物雑音の発生頻度は、日没後1~4時間後で最も多く、日中に頻度が低下した。また午前・午後に高く、昼食時および夜間低下する500Hz以下の周波数成分は、陸上の人間活動によって生じる作業音や隣接する道路を通行する自動車騒音などの人工騒音の日周変化とはほぼ一致した。また船舶航走雑音の影響

が特に強い港湾域の水中音環境について、鹿児島港周辺海域を例として海上交通の実態とその水中音環境を測定し、その特徴を求めた。鹿児島港の海上交通量は、神瀬~鴨池間では平均174隻/日で、日中(6~20時)に総交通量の84%を占め(平均約11隻/時間)、その半数以上を小型船舶が占めた。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。桜島水道南部水域の主要通航帯は、桜島水道を通る出入港船の通航帯、垂水鴨池港間のフェリー通航帯、与次郎沖を通る港内移動船の通航帯の3通航帯に区分され、各通航帯の通航率は、それぞれ27%、42%、16%であった。船舶通航密度が特に高い2通航帯の合流・交差部にあたる桜島水道最狭部の神瀬~甲突川河口間、鴨池港沖および鴨池港~沖小島間の3水域では、水中音圧が1日に140dB以上に達する頻度が45回を超え、日中では約5分に一度威嚇レベルに達していると推察される。また岸壁が港外に開いている鴨池港沖では、出入港時の操船作業が海中雑音に大きな影響を与えた。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示した。浅海域では干渉現象が頻繁に生じており、複数の船舶が同時に航行する場合、干渉模様が重なり合うが、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なかった。

停泊船舶から放射される海中雑音は、海底附近でその直接波と海底反射波が干渉する。海底反射特性と距離減衰を考慮した理論式を用いて鉛直方向で変化する干渉現象の特徴を求め、水深の異なる海域で測定した実測値と比較した。直接波の音の強さに対する海底反射波の音の強さの比 k を、

$$k = \frac{\mu h^2}{(2d-h)^2} \quad (10)$$

とすると、ハイドロホンにおける直接波と海底反射波の干渉を含む音の強さのレベル I_{IF} は、(3)、(9)、(10)式および $\omega = 2\pi f$ より

$$I_{IF} = 10 \text{Log} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} (k)^2 + k \cos \left(\frac{4\pi f(d-h)}{c} \right) \right) - 20 \text{Log} h \quad (11)$$

と表わすことができる。ここに f は音波の周波数、 c は音速、 d は水深、 f は音波の周波数、 h はハイドロホン深さ、 μ は直線波の球面拡散減衰量と海底反射波の海底面の振幅反射係数である。また任意の周波数 f における鉛直方向のスペクトルレベルの変化に見られる干渉のピーク間の距離 ΔH_{peak} は、

$$\Delta H_{peak} = \frac{c}{2f} \quad (13)$$

となる。(13)式より、鉛直方向に見られる直接波と海底反射波の干渉のピーク周期は、水深 d やハイドロホンの深さ h に関係なく周波数 f のみによって決定されるため、周波数が高いほど正の干渉の数が増し、干渉のピークは海域の水深にかかわらず海底から同じ高さに現われる。海底では、(11)式より直接波と海底反射波が同位相となるため全周波数を通して正の干渉を示し、海底に近いほどスペクトルレベルの変動が大きい。

また浅海では、航走船舶から放射される海中雑音にも直接波と海底海面を反射面とした多重反射波が干渉する。停泊船舶の場合と同じく距離減衰と反射損失を考慮した理論式を用いて浅海域における広帯域雑音の干渉現象の特徴を求め、種々の条件で測定された実測値と比較した。海面反射時の位相反転、海底反射係数 μ および球面拡散減衰による直接波の音の強さ I_0 に対する反射波の音の強さ I_i の比の三者の積 k_i を

$$k_i = (-1)^{(i-\alpha)} \mu^\alpha \left(\frac{l_0}{l_i} \right)^2 \quad (25)$$

とすると、直接波と i 個の反射波が干渉したときの音の強さのレベル I_{F_i} (dB) は、

$$I_{F_i} = 10 \log \left(\frac{1}{2} \sum_{i=0}^n k_i^2 + \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^{j-1} k_i k_j \cos \left(2\pi f \left(\frac{l_i - l_j}{c} \right) \right) \right) - 20 \log I_0 \quad (26)$$

と表わすことができる。ここに i は総反射回数、 l は伝搬距離、および μ は直線波の球面拡散減衰量と海底反射波の海底面の振幅反射係数である。ただし $i=0$ は、直接波のため $i=1$ であり、 α は海底反射回数、海面反射回数は $i-\alpha$ 、 -1 は海面反射時の位相反転を示す。音源が移動する船舶航走雑音の干渉効果の特徴は、(26)式より海底の反射特性によってスペクトログラムに現われる縞模様の鮮明度が決定される。水深が深いほど海底反射波の接近距離の変化に伴う伝搬距離変化が大きく、位相変化の周期が短くなるため縞模様が細くなる。海底反射係数 μ が0.5の海域(砂質)の場合のスペクトルパターンは、音源と受音点の距離 l が0.5海里のとき、海底3回反射 ($i=6$) 以下の伝搬経路の影響を受け、0.05海里のとき、海底1回反射波 ($i=2$) のみの影響となる。干渉模様は、同一水深の海域でもハイドロホン深さによって大きく異なる。

自己発生源である魚群内の水中音環境については、養殖生簀内で収録した水中音からゼロクロッシング法を用いて遊泳音の周期を求め、卓越周期、パワー別卓越周

期、遊泳音持続時間について検討した。魚群が遊泳する生簀内の水中音時間波形には、大別して生簀内全ての波形に存在する散発的に発生する振幅が大きく周期の極めて短い波形と、魚種により多少異なるが前者に比べ周期がやや長い2種類のパルス状波形が認められた。生簀内の水中音の周波数解析の結果、そのスペクトルは、100 Hz付近に極大値を持つ遊泳音と、1kHz以上の高周波域に極大を持つテンプラノイズに影響されて凹状分布を示す。ゼロクロッシング法で求めた遊泳音の魚種別卓越周期(周波数)は、マダイ、ヒラサマ、カンパチ10ms(100Hz)、トラフグ12.5ms(80Hz)、ブリ20ms(50Hz)で、その持続時間はブリ250ms、マダイ、カンパチ125ms、ヒラサマ64msであり、遊泳音は低周波パルス音であることが示された。

これらの魚を取りまく海中雑音は主として広帯雑音であり、浅海域では魚類の可聴範囲である1kHz以下の周波数に干渉現象などの特徴を持つ。しかし同じ強さの音であっても魚種により聴覚特性が異なるため、聞こえる音の大きさや音色は異なると考えなければならない。魚種による水中音環境の違いを求めめるため、受波側の魚類の聴覚特性として、古典的条件付けと心電図による条件反応の判定を用いてティラピアのオーディオグラムを、また呼吸周期の変化として現われる条件反応をフィルムセンサを用いてヒラメのオーディオグラムとスイープ音に対する反応を求めた。ティラピアのオーディオグラムは、300Hzに最大感度(103.5dB)を持つ凹型曲線を示した。ヒラメのオーディオグラムは、100Hz付近に最小閾値を持ち、200Hz~400Hzの周波数帯で急激に感度が低下し、スイープ音に対しても周波数が可聴域内に達すれば呼吸の抑圧が生じた。スイープ速度に対するスイープ開始から正の反応までの時間と知覚上限周波数の関係は、200Hz~400Hzの間に89%が認められ、スイープ速度が遅い場合、反応が現われる時間に個体差が大きく現われた。さらに知覚上限周波数と音圧の関係はオーディオグラムと同じ傾きを示さないが、聴覚感度が急激に低下する200~400Hzの周波数帯には、可聴周波数域と非可聴周波数域の境界が存在することが認められた。

このオーディオグラムを用いて魚種ごとの聴感補正曲線(Fish特性)を作製し、浅海における種々の海中雑音についてスペクトログラムと水中騒音レベルから魚種ごとの水中音環境を求めた。低周波狭帯域のFish特性を持つヒラメの水中音環境は、広帯域雑音に対し、可聴できる周波数範囲は狭いが、浅海域特有の低周波成分の干渉現象の影響を強く受け、音源の移動に伴う水中騒音レベルの変動を強調して受波している。一方高周波広帯

域の Fish 特性を持つマアジの水中音環境は、広帯域で音色の変化を聞くことができるが、干渉による水中騒音レベルの変動を受けない。周囲雑音には単一周波数のスイープ音は観測されなかったが、低周波狭帯域の Fish 特性を持つ魚種では、浅海域における広帯域音の干渉により狭帯域スイープ音として可聴している可能性が得られた。さらに浅海域において海底附近で顕著となる干渉現象により、停止する狭帯域音源に魚が接近して行く場合、水平移動よりも垂直移動による変化が大きくなることを示した。このように魚種によって異なる聴覚特性より、その水中音環境も異なることがわかった。

謝 辞

本研究をとりまとめるにあたり、懇篤な御指導と御助言を賜った鹿児島大学水産学部教授 松野保久博士に深甚なる敬意と感謝の意を表するとともに、有益な御助言と御校閲を賜った鹿児島大学水産学部教授 川村軍蔵博士、同学教授 松岡達郎博士、宮崎大学農学部教授 飯田貴次博士、同学助教授 延東 真博士に謹んで感謝の意を表する。そして本研究を遂行するにあたり、終始御指導および御協力を賜った鹿児島大学水産学部講師 山中有一博士に対し深甚なる感謝の意を表するとともに、終始有益な御教示を頂き、激励して下さった鹿児島大学水産学部名誉教授 肥後伸夫博士に深く感謝の意を表する。

さらに船舶航走雑音の測定を行うにあたり御協力下された鹿児島大学水産学部練習船かごしま丸船長 東川勢二氏、同練習船敬天丸船長 故湯脇康隆氏、船舶航走雑音の測定に際し観測船の操船をして頂いた新潟県立海洋高等学校教諭 久保田和平氏、心電計を貸与下されたフクダ電子西部南販売株式会社鹿児島営業所副所長 大山敏章氏、養殖生簀内での遊泳音の測定に御協力下された城山合産株式会社隼人養殖場々長 今原 勇氏、遮音室の作製にあたり御助言御協力を頂いた鹿児島大学水産学部機械工場技官 高岡勝義氏、供試魚の飼育に御協力して頂いた同学部資源栄養化学講座の学生の皆様に深く御礼申し上げます。また水産庁水産工学研究所 島山良己博士には、魚類の聴覚特性の測定方法に関して、また長崎大学水産学部助教授 藤田伸二博士には、水中音の解析に関してそれぞれ有益な御助言を頂いた。さらに鹿児島大学水産学部練習船南星丸船長 柿本 亮氏、同機関長

折田 修氏他乗組員一同には、水中音の測定全般、航跡調査など多くの実験に協力して頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

最後に、実験、観測に際し、鹿児島大学水産学部漁船航海学講座卒業生の岸本 力氏、赤星宙征氏、石野 貴氏、新名 肇氏、上水幸治氏、中島大輔氏、鮫島祐二氏、森 隆氏、渡瀬武久氏、小村 宙氏、長谷川大輔氏、柴原 誠氏、同講座4年生、鹿児島大学連合大学院生 F.E. Kaparang 氏、水産学部補手 川畑真美氏および韓国済州大学校海洋科学大学教授 鄭 龍晋博士に協力頂いた。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤枝 繁, 松野保久, 山中有一, 鄭 龍晋, 岸本 力 (1993): 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.
- 2) 藤枝 繁, 松野保久, 山中有一, 鄭 龍晋 (1994): ゼロクロッシング法による魚群遊泳音の周期解析. 日本水産学会誌, **60**, 201-205.
- 3) 松野保久, 藤枝 繁, 鄭 龍晋, 山中有一 (1994): 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.
- 4) 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**, 533-560.
- 5) 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.
- 6) 藤枝 繁, 松野保久, 山中有一, 稲元忠弘, 中島大輔 (1996): 鹿児島湾奥海域の水中音環境. 水産海洋研究, **60**, 54-61.
- 7) 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. 日本水産学会誌, **63**, 213-221.
- 8) 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**, 48-55.
- 9) 藤枝 繁, 稲元忠弘, 山中有一, 松野保久 (1998): 鹿児島湾周辺海域の水中音環境. 水産海洋研究, **62**, 12-20.
- 10) F. E. Kaparang, Y. Matsuno, Y. Yamanaka, and S. Fujieda (1998): Studies on Underwater Sounds Produced by Yellowtail *Seriola quinqueradiata* and Amberjack *Seriola dumerili* in Net Pens at Culture Grounds in Middle Kagoshima Bay. *Fisheries Science*, **64**, 353-358.
- 11) K. Olsen (1967): A Comparison of Acoustic Threshold in Cod with Recording of Ship Noise. *FAO Conference of Fish Behavior in Relation to Fishing Techniques and Tactics*, **FR: FB/67/E/16**, 7.
- 12) 小長谷庸夫 (1980): 琵琶湖の音環境および工事音の魚類に対する影響. 日本水産学会誌, **46**, 129-132.
- 13) 朴 容石, 飯田浩二, 梨本勝昭 (1995): スケソウダラの

- 聴覚閾値と雑音スペクトルレベル比. 日本水産学会誌, **61**, 847-853.
- 14) 内田恵太郎 (1934): 本邦産発音魚類について. 日本学術協会報告, **9** (2), 369-375.
- 15) 橋本富寿, 西村 実 (1956): 久里浜湾に於ける水中騒音の測定. 漁船研究技報, **9**, 219-224.
- 16) 橋本富寿, 西村 実, 間庭愛信 (1957): 定置網に入るブリ魚群の騒音について. 漁船研究技報, **10**, 69-78.
- 17) 橋本富寿, 間庭愛信 (1958): 海中生物の発する超音波騒音について. 漁船研究技報, **12**, 99-114.
- 18) 橋本富寿, 西村実, 萩野勝夫, 今井良吉, 秋元喜一郎 (1959): Sonobuoy による海中騒音および魚群の水中音の探知. 日本航海学会誌, **21**, 43-46.
- 19) 西村 実 (1961): 海中騒音および魚群音の周波数特性について. 漁船研究技報, **15**, 111-118.
- 20) G. Freytag (1971): Practical Application and Limitation in the Method of Fish Finding by Passive Listening. *Modern Fishing Gear of The World*, **3**, 51-53.
- 21) Y. Suehiro, S. Yoshino, Y. Tsukamoto and M. Saito (1957): Movements of the Fish in Response to Sound Stimuli with Reference to Sound-Intensity. *Jap. J. Ichthyology*, **6** (4/5/6), 136-140.
- 22) 橋本富寿, 間庭愛信 (1964): 音響による魚群の誘致威嚇に関する研究 (1). 漁船研究技報, **19** (3), 1-12.
- 23) 橋本富寿, 間庭愛信 (1966): 音響による魚群の誘致威嚇に関する研究 (2). 漁船研究技報, **20** (3), 1-5.
- 24) 間庭愛信, 畠山良己 (1970): 音響による魚群の誘致威嚇に関する研究 (3). 漁船研究技報, **24** (2), 1-5.
- 25) H. Suzuki (1974): Field Studies on the Effect on Artificial Underwater Sound in the Attraction of the Fish Schools. *IEEL International Conference on OCEAN 74*, **1**, 156-158.
- 26) 間庭愛信, 畠山良己 (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**, 1-21.
- 27) G. Freytag (1971): Practical Application and Limitation in the Method of Fish Finding by Passive Listening. *Modern Fishing Gear of The World*, **3**, 51-53.
- 28) 間庭愛信, 畠山良己 (1976): 音響による魚群の誘致威嚇に関する研究 (5). 漁船研究技報, **29**, 147-161.
- 29) 柴田恵司, 麻生幸則, 西ノ首英文 (1966): 旋網漁船の水中騒音 (予報). 日本航海学会誌, **35**, 57-69.
- 30) C. Chapman and A. D. Hawkins (1967): The Importance of Sound in Fish Behavior in Relation to Capture by Trawls. *FAO Conference of Fish Behavior in Relation to Fishing Techniques and Tactics*, **FR: FB/67/E/42**, 11.
- 31) G. Freytag and W. Karger (1969): The Problem of the Influence of Technical Noises on Fish. Investigations on Noises Caused by Fishery Vessels and their Sources. *Oceanology International'69 Conference, Technical Session 3*, 21.
- 32) G. Freytag and W. Karger (1969): Investigations on Noises Caused by Fishery Vessels and their Sources. *ICES Meeting, Gear and Behavior Committee, C. M. 1969 /B*, 12.
- 33) 西ノ首英之 (1970): 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.
- 34) 鈴木 裕, 濱田悦之, 斎藤清隆, 間庭愛信, 白井靖之 (1980): 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.
- 35) 畠山良己 (1984): カツオ竿釣り漁業における水中音. 海洋科学, **16**, 303-307.
- 36) 三浦汀介, 清水晋, 西山作蔵 (1985): ルアー (擬餌) の振動解析. 日本水産学会誌, **51**, 699-706.
- 37) 肥後伸夫 (1984): 水中音響と底びき網漁業. 海洋科学, **16**, 297-302.
- 38) 井上 実 (1978): 魚の行動と漁法. 恒星社厚生閣, 東京, pp. 53-55.
- 39) 南西海区水産研究所 (1971): 音響 (振動) ならびに光 (陰影) が漁業におよぼす影響 (本州四国連絡架橋漁業影響調査報告). 日本水産資源保護協会, **3**, 295-299.
- 40) 宮崎千博, 土屋 明, 武富 一 (1977): 本州四国連絡架橋の架設によって生じる騒音および振動の漁業におよぼす影響調査 (本州四国連絡架橋漁業影響調査報告). 日本水産資源保護協会, **12**, 536-562.
- 41) 石岡宏子, 畠山良己, 坂口清次 (1981): 音刺激と魚群行動 (本州四国連絡架橋漁業影響調査報告). 日本水産資源保護協会, **27**, 141-160.
- 42) 石岡宏子, 畠山良己, 坂口清次 (1982): 音刺激と行動変化 (本州四国連絡架橋漁業影響調査報告). 日本水産資源保護協会, **31**, 45-66.
- 43) 石岡宏子, 畠山良己, 坂口清次 (1985): 音刺激が魚類の生理生態におよぼす影響 (本州四国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.
- 44) A. Tsuchiya, Y. Ohta, M. Nishimura and C. Miyazaki (1981): Correlation Analysis of Man-made Underwater Sound and Fish Behavior. *J. Fac. Mar. Sci. Technol., Tokai Univ.*, **14**, 325-341.
- 45) 石岡宏子, 畠山良己, 坂口清次 (1985): 最小知覚閾値の測定 (本州四国連絡架橋漁業影響調査報告). 日本水産資源保護協会, **38**, 18-24.
- 46) 畠山良己, 黒木敏郎 (1985): トンネル発破水中音と魚の反応. 水産工学研究推進全国会議報告書, 水産庁研究部, 75-76.
- 47) H. Ishioka, Y. Hatakeyama, S. Sakaguchi, and S. Yajima (1986): The Effect of Sound Stimulus on the Behavioral Disturbance of Red Sea Bream. *Pagrus major*. *Bull. Nansei Reg. Fish. Res. Lab.*, **20**, 59-71.
- 48) H. Ishioka, Y. Hatakeyama, and S. Sakaguchi (1987): Development of the Startle Response to Sound Stimuli in the Red Sea Bream, *Pagrus major* TEMMINCK et SCHLEGEL. *Bull. Nansei Reg. Fish. Res. Lab.*, **21**, 17-23.

- 49) 黒木敏郎 (1979): 音響による魚群の大規模制御駆集効果の研究, 文部省科学研究費研究成果報告書, pp. 4-136.
- 50) 海洋牧場開発研究会 (1988): 普及型魚類音響馴致システムの研究開発. 昭和62年度マリノフォーラム21研究会報告, 169-185.
- 51) 沖縄県水産試験場 (1989): 簡易型音響給餌システムの試作. 平成元年度栽培漁業技術開発事業調査報告書, 22-24.
- 52) 中山堅二, 横川浩治 (1990): 海洋牧場基礎試験 (クロダイの音響馴致). 香川県水産試験場事業報告, 87-88.
- 53) 神谷直明, 山形陽一 (1990): トラフグ音響馴致試験. 三重県水産技術センター事業報告, 30-31.
- 54) 津田平蔵, 水谷真之 (1990): マダイの音響馴致試験. 三重県水産技術センター事業報告, 150-153.
- 55) 大慶則之 (1991): 移動型海洋牧場システム化実験事業. 石川県増殖試験場事業報告書, 39-67.
- 56) 中村幹雄, 小谷弘行 (1992): 島前湾海洋牧場開発事業. 島根県栽培漁業センター平成元年度事業報告書, 12, 38-46.
- 57) 海洋牧場開発研究会 (1993): 音響馴致を利用した根付魚類の資源管理システムの研究. 平成3年度マリノフォーラム21研究会報告, 160-170.
- 58) 小谷弘行, 後藤悦郎 (1994): 島前湾海洋牧場開発事業. 島根県栽培漁業センター平成3年度事業報告書, 14, 39-51.
- 59) 海洋牧場開発研究会 (1994): 底生魚類を対象とする海底牧場造成技術の研究. 平成4年度マリノフォーラム21研究会報告, 172-183.
- 60) 海洋牧場開発研究会 (1996): 複合型海洋牧場造成技術の開発. 平成5年度マリノフォーラム21研究会報告, 153-166.
- 61) H. Ishioka, Y. Hatakeyama, and S. Sakaguchi (1988): The Hearing Ability of the Red Sea Bream, *Pagrus major*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 54, 947-951.
- 62) Y. Hatakeyama (1989): Masking Effect on the Hearing of Red Sea Bream, *Pagrus major*, by Ambient Noise. *Int. J. Aqu. Fish. Technol.* 1, 271-277.
- 63) 小長谷庸夫 (1980): アユの音響に対するとびはね反応. 日本水産学会誌, 46, 31-34.
- 64) 小長谷庸夫 (1980): 低周波振動音に対する魚類の反応. 日本水産学会誌, 46, 125-128.
- 65) 岡本峰雄 (1982): マダイ音響馴致漁場におけるマダイを中心とした数種の魚群行動について. 日本水産学会誌, 48, 1113-1119.
- 66) 岡本峰雄 (1984): マダイ音響馴致漁場における魚群の行動について. 日本水産学会誌, 50, 211-218.
- 67) I. Aoki (1987): Control of Orientation Response by Auditory Discriminative Stimuli in the Carp. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 53, 1933-1941.
- 68) 土橋靖史, 西村昭史, 永井力郎 (1990): ピンガーによる音響馴致マダイの行動調査. 三重県水産技術センター事業報告, 30-33.
- 69) 上城義信, 寿久文, 大石節, 益田信之, 橋本晋策 (1990): 音響馴致によるマダイの滞留効果. 大分県水産試験場調査研究報告, 14, 29-39.
- 70) 上城義信 (1991): 音響馴致システムによる魚群制御. 水産工学, 28, 65-70.
- 71) G. H. Parker (1918): Hearing in Fishes. *Copeia*, 53, 11-12.
- 72) R. R. Fay (1992): Structure and Function in Sound Discrimination Among Vertebrates. "The Evolutionary Biology of Hearing" (ed. by D. B. Webster, R. R. Fay, and A. N. Popper), pp. 229-263, Springer-Verlag, New York.
- 73) 山川正巳, 池谷文夫, 畠山良己 (1986): ニジマスの聴覚特性について. 日本水産学会秋季大会講演要旨集 (昭和61年, 高知), p. 28.
- 74) 山川正巳, 河西一彦, 畠山良己 (1988): ニジマスの聴覚における方向識別能力について. 日本水産学会春季大会講演要旨集 (昭和63年, 東京), p. 38.
- 75) T. Kojima, T. Shimamura, K. Yoza, N. Okumoto, Y. Hatakeyama, and H. Soeda (1992): W-Shaped Auditory Threshold Curves of Masu Salmon *Oncorhynchus masou*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 58, 1447-1452.
- 76) 石崎宗周, 平石智徳, 山本勝太郎, 梨本勝昭 (1992): クロソイの聴覚閾値について. 日本水産学会誌, 58, 55-61.
- 77) 本松敬一郎, 平石智徳, 山本勝太郎, 梨本勝昭 (1996): クロソイの聴覚閾値と臨界比. 日本水産学会誌, 62, 785-790.
- 78) 朴容石, 飯田浩二, 向井徹, 桜井泰憲 (1995): スケソウダラの聴覚特性. 日本水産学会誌, 61, 159-163.
- 79) 張国勝, 平石智徳, 本松敬一郎, 山本勝太郎, 梨本勝昭 (1998): マコガレイの聴覚特性について. 日本水産学会誌, 64, 211-215.
- 80) 藤枝繁, 石野貴, 新名肇, 松野保久, 山中有一, 鄭龍晋 (1995): ティラピアの聴覚閾値測定. 日本水産学会誌, 61, 320-325.
- 81) 藤枝繁, 森隆, 山中有一, 松野保久 (1996): 圧電センサを利用した魚類の聴覚閾値測定. 日本水産学会誌, 62, 40-45.
- 82) 鄭龍晋, 松野保久, 藤枝繁, 山中有一 (1995): マアジの聴覚閾値. 日本水産学会誌, 61, 695-699.
- 83) 藤枝繁, 松野保久, 山中有一 (1996): ヒラメの聴覚閾値. 日本水産学会誌, 62, 201-204.
- 84) 藤枝繁 (1998): ヒラメ. "魚類の聴覚生理" (添田秀男・畠山良己・川村軍蔵編), pp. 248-259 (恒星社厚生閣, 東京).
- 85) 西ノ首英之, 藤田伸二 (1975): 音刺激に対する魚の反応行動の検討. 長崎大学水産学部研究報告, 39, 35-39.
- 86) 多田武夫, 西ノ首英之, 中才啓 (1979): 音刺激に対する魚の反応に関する研究-1, グッピー単体の純音に対する行動. 長崎大学水産学部研究報告, 47, 35-42.
- 87) 竹村陽, 西田知照, 小林洋一 (1988): 魚類の摂餌音の誘引効果について. 長崎大学水産学部研究報告, 63, 1-4.

- 88) 王 俊, 竹村 陽 (1992): ヒブナにおける誘引刺激としての水中音について. 長崎大学水産学部研究報告, **72**, 1-3.
- 89) 安楽和彦, 松田宗之, 中原真弥, 重里憲広, 川村軍蔵 (1997): 断続音によるマダイ音響馴致効果の検討. 日本水産学会誌, **63**, 934-938.
- 90) N. A. M. Schellart and A. N. Popper (1992): Functional Aspects of the Evolution of the Auditory System of Actinopterygian Fish. "The Evolutionary Biology of Hearing" (ed. by D. B. Webster, R. R. Fay, and A. N. Popper), pp. 295-322, Springer-Verlag, New York.
- 91) V. O. Knudsen (1948): Underwater Ambient Noise. *J. Mar. Res.*, **7**, 410.
- 92) C. L. Piggot (1965): Ambient Sea Noise at Low Frequencies in Shallow Water of the Scotian Shelf. *J. Acoust. Soc. Am.*, **36**, 2152.
- 93) 金 奉采, 崔 福慶, 金 大源 (1994): 沿岸海域における海中雑音への風の影響. 海洋音響学会平成6年度研究発表会講演論文集, 49-50.
- 94) 安藤浩美, 竹村 陽 (1985): 台風の通過に伴う Ambient Noise の変化について (水中音の研究7). 長崎大学水産学部研究報告, **58**, 81-93.
- 95) T. E. Heindsmann, R. H. Smith, and A. D. Arneson (1955): Effect of Rain Upon Underwater Noise Levels. *J. Acoust. Soc. Am.*, **27**, 378-379.
- 96) N. Bom (1969): Effect of Rain on Underwater Noise Level. *J. Acoust. Soc. Am.*, **45**, 150-156.
- 97) J. E. Lokken and N. Bom (1972): Changes in Rain-drop Size Inferred from Underwater Noise. *J. Appl. Meteorol.*, **11**, 553-554.
- 98) J. A. Scrimger, D. J. Evans, G. A. Mcbean, D. M. Farmer, and B. R. Kerman (1987): Underwater Noise Due to Rain, Hail, and Snow. *J. Acoust. Soc. Am.*, **81**, 79-86.
- 99) P. A. Elmore, H. C. Pumphrey, and L. A. Crum (1989): Further Studies of the Underwater Noise Produced by Rainfall. *AD Rep.*, 1-116.
- 100) M. P. Fish (1954): The Character and Significance of Sound Production Among Fishes of the Western North Atlantic. *Bull. Bingham Oceanographic Collection*, **14**, 1-109.
- 101) T. Hashimoto and Y. Maniwa (1964): Frequency Analysis of Marine Sounds. *Modern Fishing Gear of the World*, **2**, 410-412.
- 102) A. D. Hawkins and C. Chapman (1966): Underwater Sounds of the Haddock, *Melanogrammus aeglefinus*. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, **46**, 18.
- 103) A. Takemura, T. Takita, and K. Mizue (1978): Studies on the Underwater Sound VII, Underwater Calls of the Japanese Marine Drum Fishes (Sciaenidae). *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **44**, 121-125.
- 104) M. Miyagawa and A. Takemura (1986): Acoustical Behavior of the Scorpaenoid Fish *Sebastes mar-*
moratus. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **52**, 411-415.
- 105) 朴 容石, 桜井泰憲, 向井 徹, 飯田浩二, 佐野典達 (1994): 飼育下におけるスケソウダラの繁殖行動に伴う鳴音. 日本水産学会誌, **60**, 467-472.
- 106) 朴 容石, 桜井泰憲, 飯田浩二, 向井 徹 (1995): スケソウダラの発音機構. 日本水産学会誌, **61**, 243-244.
- 107) I. Miyake (1952): Observations on Sound Production and Response in Tuna. *U. S. Fish and Wildlife Serv., Spec. Sci. Rep. Fish.*, **91**, 59-68.
- 108) M. Uno and T. Konagaya (1960): Studies on the Swimming Noise of the Fish. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **26**, 1069-1073.
- 109) 竹村 陽 (1984): 水族の発生音. 海洋科学, **16**, 290-296.
- 110) A. Takemura (1971): Studies on Underwater Sounds 3. On the Mechanism of Sound Production and the Underwater Sounds Produced by *Linuparus trigonus*. *Marine Biology*, **9** (2), 87-91.
- 111) M. W. Johnson, F. A. Everest, and R. W. Young (1947): The Role of Snapping Shrimp (*Crangon* and *Synalpheus*) in the Production of Underwater Noise in the Sea. *Biol. Bull.*, **93**, 122-138.
- 112) F. A. Everest, W. Young, and M. W. Johnson (1948): Acoustical Characteristics of Noise Produced by Snapping Shrimp. *J. Acoust. Soc. Am.*, **20**, 137-142.
- 113) M. P. Fish (1963): Biological Sources of Sustained Ambient Sea Noise. "Marine Bioacoustics. W. N. Tavolga", pp. 175-194, Pergamon Press.
- 114) A. Takemura and K. Mizue (1968): Studies on the Underwater Sound-1 (On the Underwater Sound of Genus *Alpheus* FABRICIUS in the Coastal Waters of Japan). *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.*, **26**, 37-48.
- 115) A. Takemura (1969): Studies on the Underwater Sound-2, on the Diurnal Variations of the Nagasaki Prefecture. *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.*, **28**, 31-41.
- 116) A. Takemura (1972): The Distribution of Biological Underwater Noise at the Coastal Waters of Japan. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **38**, 201-210.
- 117) 小池 隆, 小長谷庸夫 (1982): デジタルカウンタによるフライングノイズの解析. 三重大水産研報, **9**, 39-47.
- 118) 藤田伸二, 山本勝太郎, 梨本勝昭, 佐藤 修 (1988): うしお丸に起因する水中音の解析. 北海道大学水産学部彙報, **39**, 286-296.
- 119) 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. 日本水産学会誌, **56**, 911-916.
- 120) 太田祐一, 土屋 明, 武富 一, 西村 実 (1984): 水中騒音の時間一周波数パターン解析, 鉄橋通過時の列車騒音について. 東海大学紀要海洋学部, **18**, 101-113.
- 121) R. J. ユーリック (1978): 水中音響の原理 (土屋明訳, 西村実監修), pp. 316-340 (共立出版, 東京).

- 122) J. M. Ide, R. F. Post, and W. J. Fry (1943): Propagation of Underwater Sound at Low Frequencies As a Function of the Acoustic Properties of the Bottom. *U. S. Nav. Res. Lab. Rep.*, S-2113.
- 123) G. M. Roe (1943): Propagation of Sound in Shallow Water. *U. S. Navy Bur. Ships Minesweeping Branch Rep.*, 65.
- 124) C. L. Pekeris (1948): Theory of Propagation of Explosive Sound in Shallow Water. *Geol. Soc. Am. Memo*, 27.
- 125) M. A. Pedersen (1962): Comparison of Experimental and Theoretical Image Interference in Deep Water Acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**, 1, 197-1, 203.
- 126) 川上連三, 小浜俊一, 江東和夫 (1971): 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, pp. 125-126.
- 127) F. B. Jensen (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.
- 128) R. B. Bachman and G. T. Kaye (1983): Broadband Interference Patterns in Shallow Water. *J. Acoust. Soc. Am.*, **74**, 576-580.
- 129) K. V. Mackenzie (1961): Long-range Shallow-water Transmission. *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 1505.
- 130) L. M. Brekhovskikh (1960): "Wave in Layered Media", Academic Press Inc., New York.
- 131) 大島孝二, 後藤啓次, 石原豊彦 (1992): 海面ダクト内音波伝搬の音線理論, モード理論及びハイブリッド理論による解析. 日本音響学会誌, **48**, 87-95.
- 132) 大島孝二, 石原豊彦 (1993): 海面ダクト内外における音波伝搬の音線及び幾何音線の解析理論による近似解析. 日本音響学会誌, **49**, 160-168.
- 133) 大島孝二, 石原豊彦 (1994): 海面 Antiwaveguide 内の周波数領域及び時間領域における音波伝搬. 日本音響学会誌, **49**, 711-722.
- 134) 九州運輸局 (1997): 九州運輸要覧 (海運編) 平成 8 年度版, pp. 301-307.
- 135) 井上欣三, 原 潔 (1973): 海上交通量の観測日数と精度. 日本航海学会論文集, **50**, 1-8.
- 136) 武富 一 (1980): 魚礁の音環境. 水産土木, **17**, 55-58.
- 137) 早坂祥三, 大木公彦, 大塚裕之, 東川勢二 (1976): 鹿児島湾奥部の海底地形と底質 (鹿児島湾の地質学的研究-III). 鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学), **9**, 53-73.
- 138) L. N. Liebermann (1948): Reflection of Sound from Coastal Sea Bottoms. *J. Acoust. Soc. Am.*, **20**, 305-309.
- 139) L. N. Liebermann (1948): Reflection of Underwater Sound from the Sea Surface. *J. Acoust. Soc. Am.*, **20**, 498-503.
- 140) W. H. Thorp (1967): Analytic Description of the Low Frequency Attenuation Coefficient. *J. Acoust. Soc. Am.*, **42**, 270.
- 141) R. H. Adlington (1963): Acoustic Reflection Losses at the Sea Surface Measured with Explosive Sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, **35**, 1834-1835.
- 142) K. V. Mackenzie (1960): Reflection of Sound from Coastal Bottoms. *J. Acoust. Soc. Am.*, **32**, 221-231.
- 143) E. G. McLeroy (1961): Complex Image Theory of Low-Frequency Sound Propagation in Shallow Water. *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 1120-1126.
- 144) D. D. Ellis and D. M. F. Chapman (1980): Propagation Loss Modelling on the Scotian Shelf: Comparison of Model Predictions with Measurements. "Bottom-Interacting Ocean Acoustics" (ed. by W. A. Kuperman and F. B. Jensen), pp. 541-555, Plenum, New York.
- 145) M. C. Ferla, G. Dreini, F. B. Jensen, and W. A. Kuperman (1980): Broadband Model / Data Comparisons for Acoustic Propagation in Coastal Waters. "Bottom-Interacting Ocean Acoustics", (ed. by W. A. Kuperman and F. B. Jensen), pp. 577-592, Plenum, New York.
- 146) 山田英行 (1981): 魚の遊泳音に関する研究. 長崎大学大学院水産学研究科修士論文, p. 710.
- 147) 松野保久, 山中有一 (1986): 鹿児島湾における水中音について-Ⅱ, ハマチ (モジャコ) の発声音. 鹿児島大学水産学部紀要, **35**, 129-132.
- 148) 南 茂夫, 喜利元貞, 桜井捷海 (1982): "機器分析のためのコンピュータ入門", pp. 126-127 (講談社, 東京).
- 149) 大崎順彦 (1976): "地震動のスペクトル解析入門", pp. 17-26 (鹿島出版会, 東京).
- 150) A. Savitzky and M. J. E. Golay (1964): Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, **36**, 1, 627-1, 639.
- 151) M. P. Fish and W. H. Mowbray (1970): "Sounds of Western North Atlantic Fishes", p. 207, Johns Hopkins Press, Baltimore.
- 152) C. J. Chapman and O. Sand (1974): Field Studies of Hearing in Two Species of Flatfish, *Pleuronectes platessa* (L) and *Limanda limanda* (L) (family Pleuronectidae). *Comp. Biochem. Physiol.*, **47**, 371-385.
- 153) H. E. Karlsen and O. Sand (1991): Infrasound Detection in Fish. *Biomed. Res.*, **12**, 217-219.
- 154) A. D. Hawkins and A. D. F. Johnstone (1978): The Hearing of the Atlantic Salmon, *Salmo salar*. *J. Fish. Biol.*, **13**, 655-673.
- 155) P. S. Enger (1967): Hearing in Herring. *Comp. Biochem. Physiol.*, **22**, 527-538.
- 156) A. N. Popper, A. T. Chan, and N. L. Clarke (1973): An Evaluation of Methods for Behavioral Investigations of Teleost Audition. *Behav. Meth. and Instru.*, **5**, 470-472.
- 157) R. R. Fay (1974): Masking of Tones by Noise for the Goldfish (*Carassius auratus*). *J. Comp. Physiol. Psy-*

- chol.*, **87**, 708-716.
- 158) W. N. Tavolga and S. Wodinsky (1963): Auditory Capacities in Fishes. Pure Tone Thresholds in Nine Species of Marine Teleosts. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.*, **126**, 177-239.
- 159) D. W. Jacob and W. N. Tavolga (1968): Acoustic Frequency Discrimination in the Goldfish. *Anim. Behav.*, **16**, 67-71.
- 160) A. N. Popper (1972): Pure-Tone Auditory Thresholds for the Carp, *Cyprinus carpio*. *J. Acoust. Soc. Am.*, **52**, 1714-1717.
- 161) S. Coombs and A. N. Popper (1979): Hearing Differences Among Hawaiian Squirrelfish (Family: Holocentridae) Related to Differences in the Peripheral Auditory System. *J. Comp. Physiol.* **132**, 203-207.
- 162) 山森邦夫 羽生功 日比谷京 (1971): ウナギ心電図の水中電極による導出. 日本水産学会誌, **37**, 94-97.
- 163) 難波憲二, 村地四郎, 河本真二, 中野義久 (1973): 魚類の心電図に関する研究 - I. 広島大学水畜学部紀要, **12**, 147-154.
- 164) 小島隆人, 杉山 豊, 余座和征, 添田秀男 (1993): 体表面に装着した電極によるニジマスの心電図導出法について. 日本水産学会秋季大会講演要旨集 (平成5年度, 長崎), p. 14.
- 165) H. Levitt (1971): Transformed Up-down Methods in Psychoacoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, **49**, 467-477.
- 166) 岩井 保 (1978): 呼吸循環系の機能解剖学. “魚の呼吸と循環” (日本水産学会編), pp. 7-19 (恒星社厚生閣, 東京).
- 167) 飯田一嘉 (1996): 遮音材料. “騒音・振動防止機器活用事典” (新環境管理設備事典編集委員会編), pp. 56-69 (産調出版, 東京).
- 168) G. M. Hughes (1960): A Comparative Study of Gill Ventilation in Marine Teleosts. *J. Exp. Biol.*, **37**, 28-45.
- 169) H. W. Smit, N. A. M. Schellart, and C. A. Grimbergen (1986): Gain-Controlled Frequency Sweep Generator for Auditory Stimulation. *Med. Bio. Eng. Comput.*, **24**, 442-446.
- 170) R. R. Fay (1989): Intensity Discrimination of Pulsed Tones by the Goldfish (*Carassius auratus*). *J. Acoust. Soc. Am.*, **85**, 500-502.
- 171) W. N. Tavolga (1974): Signal/Noise Ratio and the Critical Band in Fishes. *J. Acoust. Soc. Am.*, **55**, 1323-1333.
- 172) C. J. Chapman and A. D. Hawkins (1973): A Field Study of Hearing in the Cod, *Gadus morhua* L. *J. Comp. Physiol.*, **85**, 147-167.
- 173) D. A. Mann, Z. Lu, and A. N. Popper (1997): A Clupeid Fish can Detect Ultrasound. *Nature*, **389**, 341.
- 174) G. M. Wenz (1962): Acoustic Ambient Noise in the Ocean, Spectra and Sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**, 1936-1956.
- 175) 不破 茂, 森宣仁, 石崎宗周, 藤田伸二, 今井健彦 (1998): 振縄の動態と駆集機構. 日本水産学会誌, **64**, 235-242.
- 176) 添田秀男, 小島隆人 (1998): マダイ. “魚類の聴覚生理” (添田秀男・畠山良己・川村軍蔵編), pp. 209-215 (恒星社厚生閣, 東京).
- 177) C. J. Chapman and A. D. F. Johnstone (1974): Some Auditory Discrimination Experiments on Marine Fish. *J. Exp. Biol.*, **61**, 521-528.
- 178) A. D. Hawkins and O. Sand (1977): Directional Hearing in the Median Vertical Plane by the Cod. *J. Comp. Physiol.* **122**, 1-8.
- 179) A. Shuijf and A. D. Hawkins (1983): Acoustic Distance Discrimination by the Cod. *Nature*, **302**, 143-144.
- 180) R. R. Fay (1982): Neural Mechanisms of an Auditory Temporal Discrimination by the Goldfish. *J. Comp. Physiol.*, **147**, 201-216.
- 181) C. Platt (1977): Hair Cell Distribution and Orientation in Goldfish Otolith Organs. *J. Comp. Neur.*, **172**, 283-298.
- 182) J. T. Corwin (1983): Postembryonic Growth of the Macula Neglecta Auditory Detector in Hair Cell Number, Neural Convergence, and Physiological Sensitivity. *J. Comp. Neur.*, **217**, 345-356.
- 183) T. N. Kenyon (1996): Ontogenetic Changes in the Auditory Sensitivity of Damselfishes (Pomacentridae). *J. Comp. Physiol. A*, **179**, 553-561.
- 184) R. R. Fay and T. J. Ream (1992): The Effects of Temperature Change and Transient Hypoxia on Auditory Nerve Fiber Response in the Goldfish (*Carassius auratus*). *Hearing Research*, **58**, 9-18.