

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

松野保久*・藤枝 繁*・山中有一*・F. E. KAPARANG*・
有田洋一*・栗原哲哉*

Underwater Sound Production by Amberjack, *Seriola dumerili*, in the Net Pen at the Culture Grounds in Skurajima Strait of Kagoshima Bay

Yasuhisa MATSUNO*, Shigeru HUIJEDA*, Yuichi
YAMANAKA*, Frangky E. KAPARANG*, Yoich ARITA*
and Tetsuya KURIHARA*

Abstract

This paper describes some characteristics of underwater sound within the net pens at two culture grounds in Sakurajima Strait of Kagoshima Bay. The big sized (weight; 3.5-4kg), the middle sized (2kg) and the small sized (200-500g) amberjacks, *Seriola dumerili*, were cultured in the respective net pens. The observations of underwater sound were carried out at each culture ground. In order to obtain the frequency characteristics, the underwater sounds produced by the respective sized fish school were analyzed by the three kinds of method; one third octave band, sound spectrograph and power spectrum.

The ambient noise level in Sakurajima Strait was about 105-107dB. The level of underwater sound pressure was 115-130dB in the swimming fish school and 118-130dB in the feeding fish school. It was presumed that the swimming action of amberjack school produced 20-30Hz within very low frequency band. When the fish swam slowly, the main frequency band level was below 125Hz, and, with the increasing of the speed, it produced higher frequencies (400Hz, 1.6-3.15kHz) which were especially distinguished among other high frequency bands. Adding to these, it was assumed that the small sized fish school produced higher frequency band than the big sized one. In all frequency bands, the frequency band level in feeding was higher than that in swimming.

1. はじめに

魚類の捕食中に発する音(間庭・畠山, 1970, YAMAGUTI *et. al.*, 1975, 竹村ほか, 1988), そして魚の可聴域内のある種の音には, 魚群に対して誘致効果(上城ほか, 1990, 神谷・山形, 1990)を持つことが認められており, 音環境が魚類の行動, 成育状況に大いに関連するものと推察される。筆者らは, 閉鎖空間で飼育される魚類の受ける音環境の実態を明らかにす

る目的で, 養殖場生簀内の水中音を測定してきた。現在鹿児島県における魚類養殖業はブリが主体である。しかし近年カンパチ養殖の割合が増加し, 近い将来ブリ養殖に追い付き追い越すであろうとする見方もある。またブリの水中音に関する報告は見られるがカンパチに関するそれはほとんど見当たらない。そこで本稿では, 鹿児島湾桜島水道にある2箇所の養殖場生簀内におけるカンパチの遊泳音と捕食音を分析し, 同湾奥海域養殖場での結果(松野ほか, 1994)も合わせて比較検討した。

1996年2月6日受理

* 鹿児島大学水産学部 Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20, Shimoarata 4, Kagoshima 890, Japan.

2. 実験方法

2.1. 測定装置

測定装置は湾奥海域養殖場で使用したもの（松野ほか、1994）と同じである。生簀内における水中音測定時、水中マイクロホンのコードと遊泳中の魚との接触を避けるため、水中マイクロホンを小型ブイにより吊し、生簀角から1m、水深1mの位置に保持した。計測器類は船外機付きの小型船（以降測定船と記す）に搭載し、それぞれ規定の直流電源により作動させた。なお水中音圧計内部のハイパス、ローパスフィルターの周波数はそれぞれ10Hz、10kHzに設定した。

2.2. 測定海域と資料

1995年8月24日～25日、桜島水道桜島側の西桜島町赤生原（あこうばる）養殖場と薩摩半島側の鹿児島市竜ヶ水養殖場（Fig. 1）において、生簀内に飼育されている大型、中型、小型の各カンパチ魚群が遊泳中ならびに捕食中の水中音を測定した。また両養殖場沖合い海域で周囲雑音とみなせる水中音も合わせて測定した。生簀内の水中音測定時には測定船を生簀に係留し、養殖場沖合いでの測定時には同船を漂流させた。

両養殖場とも生簀の大きさは全て縦8m×横8m、深さ7mであった。なお赤生原養殖場におけるカンパチ大型魚の平均体重は4kg、中型魚2kg、小型魚500g

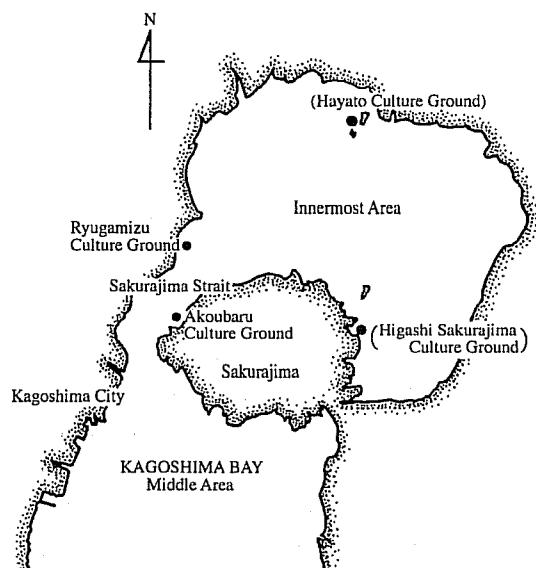


Fig. 1. Locations of culture grounds where the measurements of underwater sound were carried out in the net pen. The measurements at Akoubaru and Ryugamizu were carried out in 1985, Hayato and Higashi sakurajima were in 1983.

でそれぞれ4000尾、6000尾、8000尾存在した。また竜ヶ水養殖場におけるカンパチ大型魚の平均体重は3.5kg、中型魚2kg、小型魚200gで、それぞれ3000尾、3000尾、8000尾存在した。

給餌方法は両養殖場とも手撒き方式とし、赤生原養殖場ではイワシ、アジの魚肉とモイストの混合飼料を、竜ヶ水養殖場では大型魚、中型魚には前記と同様の魚肉を、小型魚にはペレットをそれぞれ与えた。

全ての測定期間中、給餌船の機関および給餌機は停止し、付近に航行船舶がないことを確認した上で測定を実施した。この時、天候晴れ、風浪階級1～2、表面水温28～29℃であった。また生簀設置場所の水深は赤生原養殖場35～50m、竜ヶ水養殖場70～80mであった。前者養殖場における潮流は停止状態であり、後者養殖場における潮流は約1ktの北流が認められた。

2.3. 水中音の分析

水中音の周波数分析には騒音・振動解析装置 SA-74（リオン製）およびDSP ソナグラフ 5500（KAY 製）を使用した。

1/3 オクターブ分析に要したデータ長は1分50秒で平均回数30回とした。同分析の中心周波数は低い方から16Hz、20Hz、25Hz、31.5Hz、40Hz、50Hz、63Hz、80Hz、100Hz、125Hz、160Hz、200Hz、250Hz、315Hz、400Hz、500Hz、630Hz、800Hz、1kHz、1.25kHz、1.6kHz、2kHz、2.5kHz、3.15kHz、4kHz、5kHz、6.3kHz、8kHzであり、最小下限周波数は14Hz、最大上限周波数は9kHzである。この音圧レベル（dB）の基準音圧は1μPaである。

サウンドスペクトログラム及びパワースペクトラムによる分析条件は周波数帯域（以降帯域と記す）10Hz～1kHz、トランスフォームサイズ512pts（29Hz）、分析窓Hamming、ダイナミックレンジ42dBとした。この時の周波数分解能は2.5Hzであった。

3. 分析結果

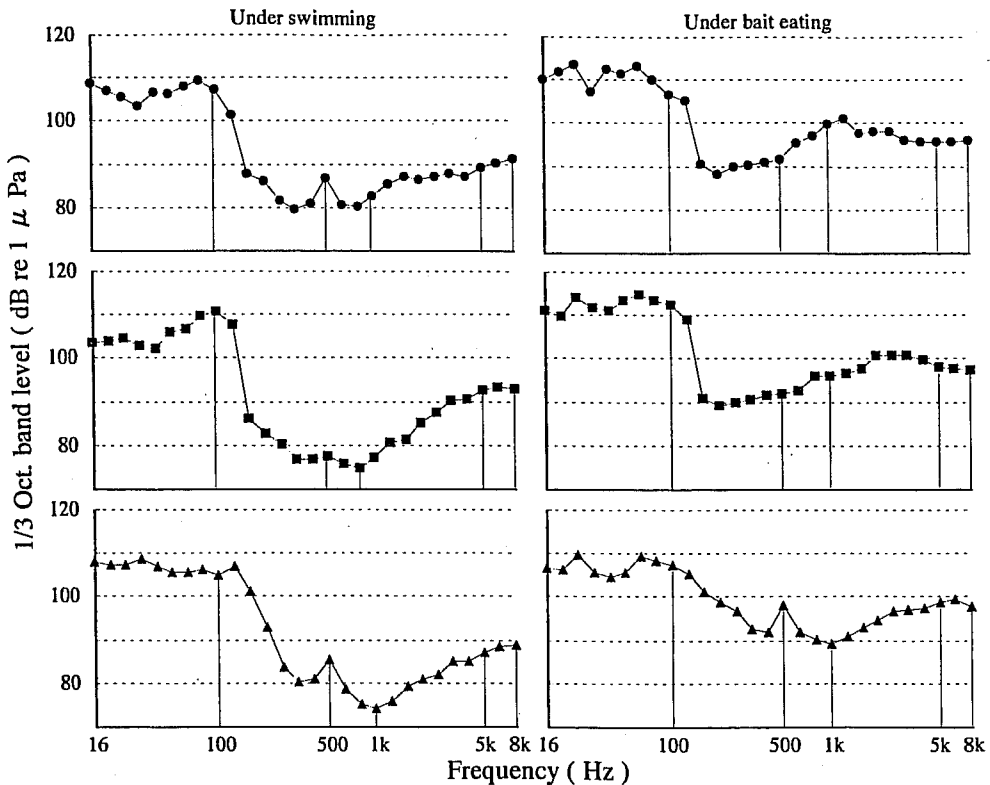
3.1. 水中音圧

赤生原養殖場における生簀内の水中音圧オーバーオール値（以降水中音圧と記す）（Table. 1）は115～123dBの間であった。遊泳中の水中音圧は115～117dB、捕食中の水中音圧は118～123dBの間にあり、大型魚、中型魚、小型魚いずれの場合も捕食中の方が大きな音圧値を示した。

竜ヶ水養殖場における生簀内の水中音圧（Table. 1）

Table 1. Underwater sound pressure level of amberjack in each net pen at Akoubaru and Ryugamizu culture ground.

		Big size (dB)	Middle size (dB)	Small size (dB)
Akoubaru culture ground	Under swimming	117.1	116.2	115.2
	Under bait eating	122.7	121.2	117.9
Ryugamizu culture ground	Under swimming	129.7	122.4	126.0
	Under bait eating	129.7	129.0	120.0

**Fig. 2.** One third octave band analyses of underwater sound in the swimming and in the feeding fish school of amberjack in the net pen at Akoubaru culture ground.

● : Big size ■ : Middle size ▲ : Small size

は、120～130dB の間にあった。遊泳中の水中音圧は122～130dB、捕食中の水中音圧は120～130dB の間にあった。小型魚の場合、遊泳中より捕食中の方が小さな音圧値を示し、他の結果と異なった。

赤生原養殖場沖合いにおける水中音圧は約107dBで、同養殖場生簀内のそれより10～16dB小さかった。また竜ヶ水養殖場沖合いにおける水中音圧は約105dBで、同養殖場生簀内のそれより15～25dB小さかった。

3.2. 1/3 オクターブ分析

赤生原養殖場における遊泳中の周波数分布 (Fig. 2) は、凹状分布パターンを示した。周波数100Hz (以降周波数は省略する) 前後にある音圧レベル極大 (以降極大と記す) の周波数は大型魚80Hz、中型魚100Hz、小型魚125Hz、そして1kHz前後にある音圧レベル極小 (以降極小と記す) の周波数は大型魚800Hz、中型魚800Hz、小型魚1kHzであった。捕食中の周波数分布 (Fig. 2) も凹状パターンを示した。極大の周波数は大型魚25Hz、45～63Hzおよび1.25kHz、中型魚25Hz、63Hzおよび2～4kHz、小型魚25Hz、63Hzおよ

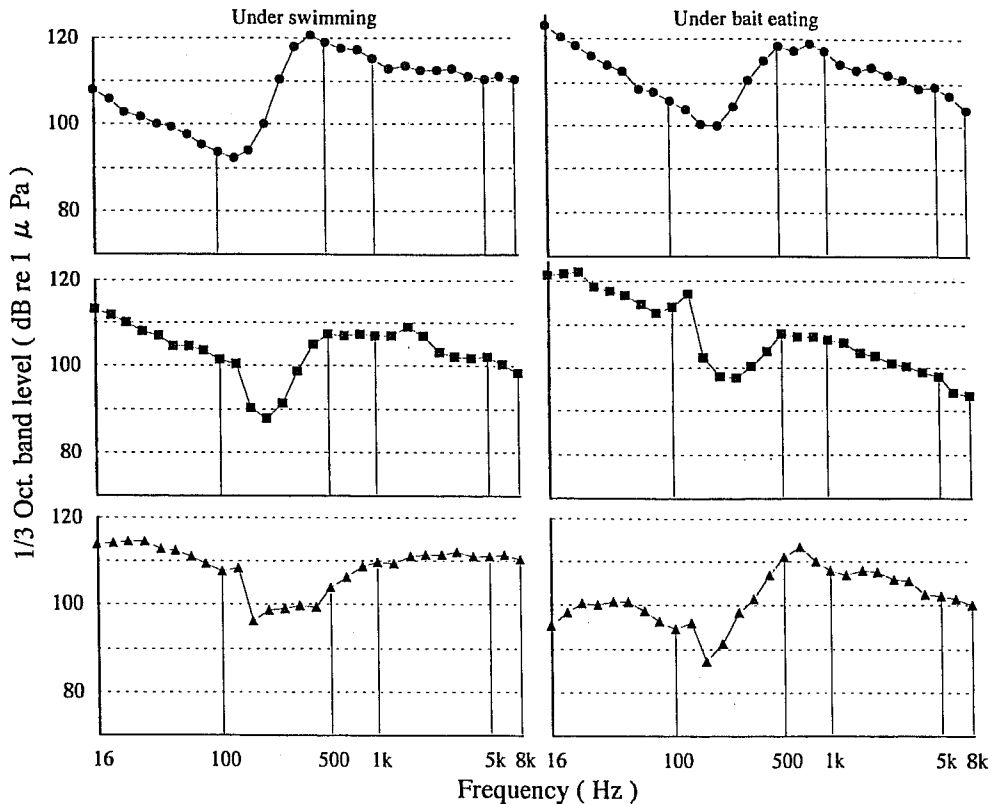


Fig. 3. One third octave band analyses of underwater sound in the swimming and in the feeding fish school of amberjack in the net pen at Ryugamizu culture ground.

● : Big size ■ : Middle size ▲ : Small size

び6.3kHzであった。大型魚、中型魚、小型魚ともに全ての帯域にわたり遊泳中より音圧レベル（以降レベルと記す）が大きくなる傾向にあった。

竜ヶ水養殖場における遊泳中の周波数分布（Fig. 3）は赤生原養殖場におけるものと異なる分布パターンを示した。特に大型魚のレベルは125Hzまで直線的に減少し、400Hzまで増大、再び8kHzまで直線的に減少した。極小の周波数は大型魚が最も低い125Hzであり、極大の周波数は大型魚400Hz、中型魚1.6kHz、小型魚3.15kHzであった。捕食中の分布パターン（Fig. 3）は小型魚を除いて遊泳中のものと類似した。極小の周波数（160～200Hz）より高い帯域における極大の周波数は大型魚500～800Hz、中型魚500Hz、小型魚630Hzであった。

3.3. サウンドスペクトログラムとパワースペクトラム分析

両養殖場における生簀内魚群の水中音のサウンドスペクトログラムとパワースペクトラム（Fig. 4～7）は

分析帯域10Hz～1kHzにおける遊泳中（A）、捕食中（B）の分析結果を示している。パワースペクトラムはサウンドスペクトログラムに示された1.2秒間の平均を示したものである。大型魚と中型魚は似た傾向にあったので、ここでは大型魚と小型魚の分析結果を示した。

赤生原養殖場における大型魚（Fig. 4）遊泳中のサウンドスペクトログラムは、125Hz以下の帯域と625Hz以上の帯域に水中音の強い成分があることを示した。パワースペクトラムには多数の極大が示されているが、その中で注目される周波数のみ取り上げれば（以降も同様である）両帯域における極大の周波数は20～25Hz、42.5～45Hz、55～65Hzおよび約800Hzであった。捕食中の強い成分は全帯域にみられ、200～750Hzの帯域において、捕食中のレベルは遊泳中のそれより大きくなる傾向にあった。また125Hz以下の帯域における極大の周波数は20～25Hz、40～65Hzであった。小型魚（Fig. 5）遊泳中の強い成

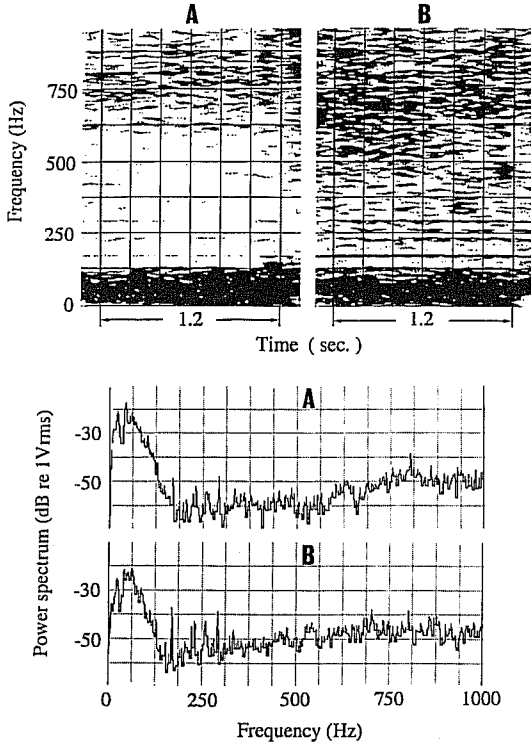


Fig. 4. The sound spectrograph (above) and the power spectrum (below) of the underwater sound of the big sized amberjack in the net pen at Akoubaru culture ground.

A : under swimming
B : under bait eating

分は約 250Hz 以下にみられ、極大の周波数は 30~32.5 Hz, 60~62.5Hz, 80~85Hz, 122.5~130Hz であった。捕食中の強い成分は約 750Hz 以下にみられ、125Hz 以下の帯域における極大の周波数は 30~32.5Hz, 60~67.5Hz であった。

竜ヶ水養殖場における大型魚 (Fig. 6) 遊泳中の強い成分は 40~50Hz 以下の帯域と約 190Hz 以上の帯域にみられた。両帯域における極大の周波数は 12.5~30 Hz, 300~340Hz, 400~445Hz であった。捕食中の強い成分は約 80Hz 以下の帯域と 250Hz 以上の帯域にみられ、極大の周波数は 15Hz, 560Hz, 620~627Hz であった。小型魚 (Fig. 7) 遊泳中の強い成分は約 250Hz 以下の帯域と 625Hz 以上の帯域にみられた。捕食中の強い成分は 250Hz 以上の帯域にみられ、極大の周波数は 535~635Hz であった。

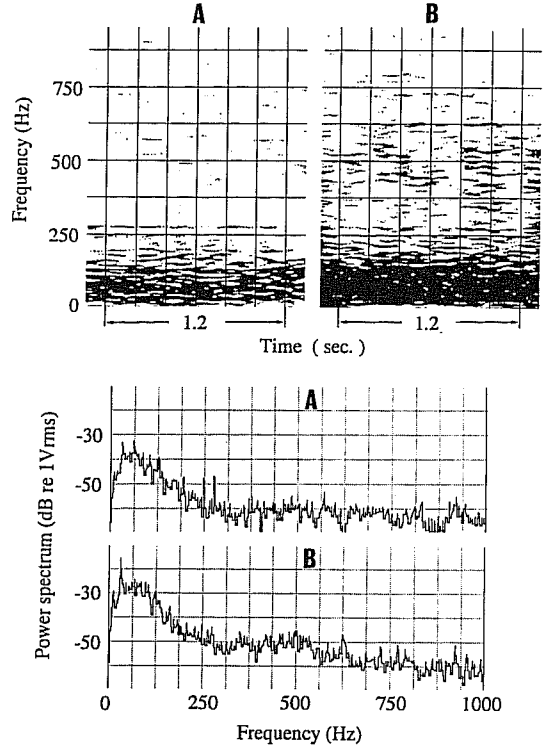


Fig. 5. The sound spectrograph (above) and the power spectrum (below) of the underwater sound of the small sized amberjack in the net pen at Akoubaru culture ground.

A : under swimming
B : under bait eating

4. 考察

4.1. 水中音圧と周波数分布パターンの検討

桜島水道は鹿児島市と桜島間の幅約 2.5km の水道である。水道中央部の最も浅い水深は約 30~40m、潮流は大潮時には 1.5~1.7kt に達する。水道南端に近い水域には鹿児島港と桜島袴腰港を結ぶ東西の航路上を、昼夜連続して 5 隻のフェリーボート (総トン数約 500~1000トン、機関馬力 700~1400HP) が 10 分間隔で運航されている。そしてこの航路中央付近から赤生原養殖場は約 2.3km、竜ヶ水養殖場は約 6km 離れた場所に位置している。また湾中央海域には鹿児島港に出入する大型定期船をはじめ多くの船舶が航行している。赤生原養殖場沖合いにおける周囲雑音とみなせる水中音圧は約 107dB、竜ヶ水養殖場沖合いは約 105dB、湾奥海域の同値は季節は異なるが 103~105dB であった。今回赤生原養殖場沖合いの周囲雑音が竜ヶ水養殖場沖

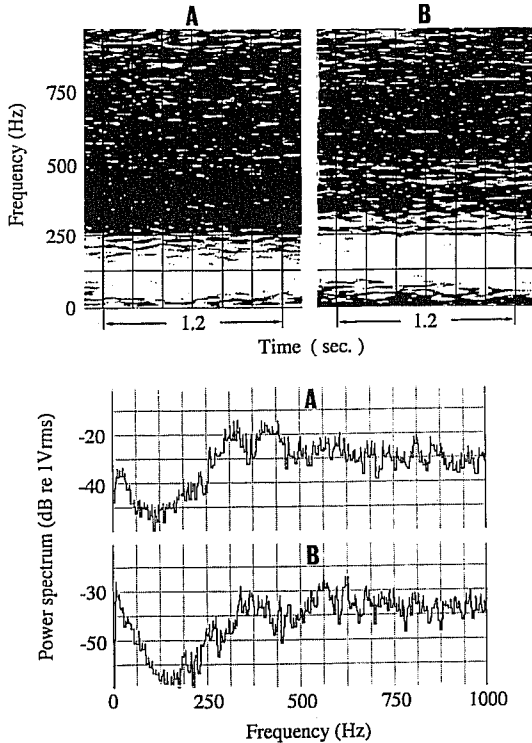


Fig. 6. The sound spectrograph (above) and the power spectrum (below) of the underwater sound of the big sized amberjack in the net pen at Ryugamizu culture ground.

A : under swimming
B : under bait eating

合い、そして湾奥海域より大きくなった主たる起因は船船から放出される水中騒音の影響であると推察される。

生簀内における魚群遊泳中の1/3オクターブ分析結果の分布パターン (Fig. 2, 3) は両養殖場で異なった。赤生原養殖場の同パターンは湾奥海域養殖場と類似したが、竜ヶ水養殖場 (Fig. 3) のパターン (16~125Hzあるいは16~200Hzの帯域において、ほぼ直線的に減少する傾向) は他の全てと異なった。生簀内水中音測定時、赤生原養殖場における潮流は停止状態に近く、魚群の遊泳状態もごく普通に見えた。竜ヶ水養殖場における潮流は40~50cm/sの北流があり、生簀を構成している網地は流れの方向に吹かれる状態にあった。この生簀内における全ての魚群の活動は活発であり、特に大型魚生簀内では、水中音圧計での聴音モニターにより遊泳音が十分に確認できた。生簀内水中音の測

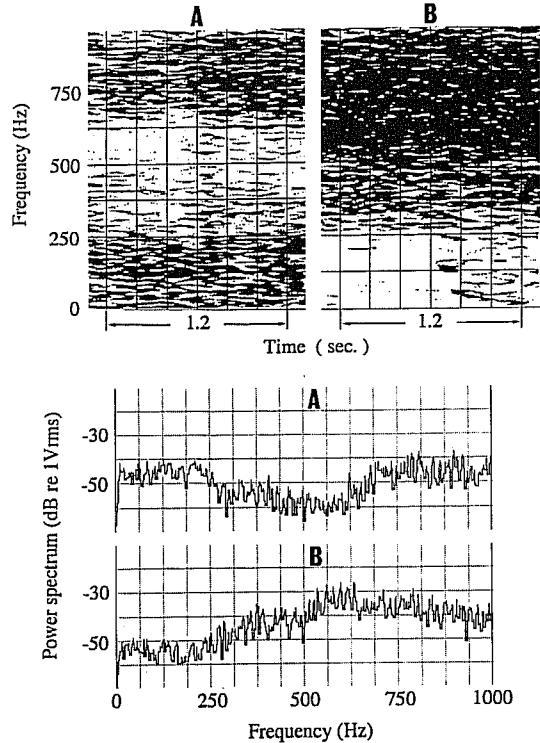


Fig. 7. The sound spectrograph (above) and the power spectrum (below) of the underwater sound of the small sized amberjack in the net pen at Ryugamizu culture ground.

A : under swimming
B : under bait eating

定時には、測定船を生簀に係留したため、相対的に水中マイクロホンの対水速度は40~50cm/sとなった。しかし養殖場沖合いでの測定時には測定船を漂流させたため、また風力も小さかったので水中マイクロホンの対水速度はほとんど無視できた。

このように両養殖場生簀内における測定条件の違いは、潮流の有無のみであると考えられたので、改めて潮流が約50cm/s時の水中音を記録し分析した結果、16~160Hzまで直線的に約25dB減少し、竜ヶ水養殖場大型魚 (Fig. 3) の16~125Hzの分布パターンと酷似した。この現象の起因は海水と小型ブイそして水中マイクロホン及びそのコードとの摩擦により起こる振動、潮下にできるカルマン流などの総合的な影響によるものと推察される。黒木 (1958) は流速40cm/sの流水中における直径8.2mmのカタナの振動数は10Hz以下としている。このように潮流の影響によ

て生ずる水中音の周波数は低い帯域であろうと推察され、125~160Hzの帯域にまで及ぶのか疑問視されるところであり今後の検討課題としたい。

4.2. 遊泳音の検討

赤生原養殖場における125Hz以下の低周波帯域(以降125Hz以下を低周波帯域、これを越える帯域を高周波帯域と記す)ならびに竜ヶ水養殖場の高周波帯域における1/3オクターブ分析結果から、カンパチ魚群がゆっくり遊泳している時は低周波帯域を、遊泳速度が上昇すると低周波帯域と共に高周波帯域をも発し、この時、魚体が小さくなる程高い帯域を発することを示唆している。

赤生原養殖場の遊泳中のパワースペクトラム分析結果は、低周波帯域において、上記帯域よりさらに低い帯域を放射していることを示唆している。湾奥海域養殖場におけるカンパチ魚群の平均体重は3.5kg(竜ヶ水養殖場の大型魚と同じ)と1.3kg(中型魚と小型魚の間)であり、両者の遊泳音はともに63~80Hzが卓越したが、これ以下の卓越する帯域を推定することは困難であった。しかし今回の測定結果から、カンパチの遊泳音は魚体の大きさにかかわらず、63Hzより低い帯域まで発する可能性が確かめられた。

他魚種であるブリとの比較において、山田(1981)の報告によれば、ブリ(若魚で体長30cm, 100尾)が生簀内を急速円運動する時の遊泳音は100Hzと500Hz付近に極大を持つとしている。これは赤生原養殖場中型魚の1/3オクターブ分析結果とほぼ一致する。このブリの体重は約2kgと推定されカンパチ中型魚に相当する。カンパチはアジ科の魚であり、ブリより側偏度が強く体高が高い。しかし外見上両者の体型は酷似しており、これがカンパチとブリの発する周波数が似通った主たる要因であろうと推察される。

4.3. 捕食音の検討

赤生原養殖場の捕食中の1/3オクターブ分析結果は、遊泳中よりさらに低い帯域まで放射することを示している。しかしパワースペクトラムの分析結果によれば、捕食中のレベルは遊泳中のそれより大きくなる傾向にあるが、両者の極大周波数には大きな相違はみられなかった。これら各低周波帯域のレベルが遊泳中のものより大きくなった起因は、給餌によりカンパチが摂餌行動を起こし、遊泳速度が増加したことによるものと推定される。湾奥海域養殖場での捕食音が50Hz以下の帯域において卓越したのも同様の理由によると推察される。

高周波帯域においては、魚体が小さくなるに従いより高い帯域を発する傾向にあった。湾奥海域養殖場の大型魚は800Hz~3.15kHzが卓越し、赤生原、竜ヶ水両養殖場における大型魚の卓越する帯域と多くの部分が重複した。また湾奥海域養殖場の1.3kg魚は315~800Hzが卓越し、竜ヶ水養殖場における中型魚、小型魚の卓越する帯域の一部に相当したが、赤生原養殖場におけるものとは異なった。

間庭(1984)は生簀の中で餌を投げ与えた場合に速やかに泳いできて捕食し、水面を打つようにして身をひるがえして泳ぎ去る時、捕食音と遊泳音が混合した音が発生すると述べている。今回の測定において、低周波帯域から高周波帯域まで広い帯域にわたってレベルが大きくなったのは、カンパチが捕食のため高速で遊泳し、勢いよくぶつかりあい、そして水面を打つ動作によって発生する帯域の水中音が卓越することによると推定される。また、最大のレベルを示す帯域はこのような複雑な動作にかかわる諸条件の相違により偏位したものと推察される。

YAMAGUTI *et. al.* (1975)、竹村ほか(1988)は餌の硬軟によって捕食音の周波数分布に差異がみられることを指摘している。今回、両養殖場における飼料は軟らかいモイストペレット、イワシ・アジ及び一部硬いペレットであったが、カンパチ自身が飼料を両顎の歯で咀嚼する時に発生する音、そして嚥下する時の咽頭歯からの音などの判別は資料不足もあり困難であった。細部の検討は今後の課題としたい。

間庭(1984)は、ハマチの捕食音は3.5kHz位までで300~800Hzが卓越し、竹村(1988)は、ブリは2~2.5kHzに強い成分を有すると述べている。間庭の示す帯域は竜ヶ水養殖場における大型魚の分析結果と、そして竹村の示す帯域は赤生原養殖場における中型魚の分析結果と似通っている。しかし捕食音は前述したように広帯域に亘り分布し、極大の周波数も飼料に突進する魚群行動の活発さの度合など、諸条件の違いにより複雑に偏位すると推察され、今回の測定結果からカンパチとブリの周波数特性の相違を把握することは困難であった。

5. 謝辞

本研究を行うにあたり、西桜島漁業協同組合長である有限会社森勝水産取締役社長森勝哉氏には実験計画実施全般にわたり種々御助言御協力頂き、さらに赤生原養殖場生簀内の水中音収録時、測定船上にて直接

手伝い下された。また有限会社折田水産取締役社長折田健一氏には竜ヶ水養殖場にて測定のための便宜を図って頂いた。ここに厚く御礼申し上げる。

文 献

- 上城義信・寿久文・大石節・益田信之・橋本晋作(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書, 14, 29-39.
- 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, pp. 11.
- 黒木敏郎(1958) 魚類生態に関与する水中音の基礎的研究(第II報)―水中で発するヒモの音について―. 鹿児島大学水産学部紀要, 6, 89-94.
- 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.
- 間庭愛信(1984) 海中生物の鳴音の例と水中音に対する反応の実験と実用例. 海洋科学, 167, 290-296.
- 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, 58-1, 11-20.
- 竹村 暁・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.
- 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, pp. 710
- YAMAGUTI, Y., W. SAKAMOTO and INAGAKI (1975) Spectrum Analysis of Sound Made by Feeding Fish in Relation to Their Movements. Bull. Fac. Fish., Mie Univ., 2, 39-42.