

養殖生簀内における魚群遊泳音の特徴

藤枝 繁^{*1}, 松野保久^{*1}, 山中有一^{*1},
鄭 龍晋^{*2}, 岸本 力^{*1}

Feature of the Swimming Sound for Fishes in the Netting Cages at the Culture Ground

Shigeru Fujieda^{*1}, Yasuhisa Matsuno^{*1}, Yuichi Yamanaka^{*1},
Yong-jin Chung^{*2}, and Chikara Kishimoto^{*1}

Keywords : Fishes, Swimming sounds, Netting cage, Underwater sound,
Power spectrum analyses

Abstract

This paper describes some feature of the swimming sounds for fishes within the netting cages were recorded at Hayato culture ground in the innermost area of Kagoshima Bay. Subjects of investigation were Yellowtail *Seriola quinqueradiata*, Amberjack *Seriola dumerili*, Amberjack *Seriola lalandi*, Red Sea Bream *Pagrus major*, and Tiger Puffer *Takifugu rubripes*.

The recorded underwater sounds were analyzed with the three kinds of method in order to obtain the characteristics of wave forms and frequency; three-dimensional expression of multiframe wave form, power spectrum, and one third octave band analyses.

In result, swimming sounds in the main band width ranging from 50Hz to 400Hz, and TEMPURA Noise in the band width ranging above 500Hz were observed to two typical wave form of underwater sounds in a netting cage. Swimming sounds were sporadic wave in a state of pales. A concavity pattern appeared at the near boundary of them in the band width ranging from 200Hz to 1kHz.

*1 鹿児島大学水産学部漁船航海学講座 (Laboratory of Fishing Vessel Navigation, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

*2 鹿児島大学大学院連合農学研究科 (The United Graduate School of Agricultural Science, Kagoshima University, 21-24 Korimoto 1, Kagoshima, 890 Japan)

音響における魚群制御のハードウェア開発は、主として魚の聴覚特性を基礎に進められてきた¹⁾。現在行われているマダイ音響馴致場では、マダイの聴覚が最も優れている周波数帯の人工音(300Hz, 0.75s 間隔の鋸歯状波)を制御刺激として利用している²⁾。しかし、この人工音はあくまでも条件づけされた魚を制御する刺激にすぎず、条件付けされていない魚や条件付けされにくい魚種³⁾の制御には有効とはいえない。一方、自然界に存在する魚の発生音は単なる音刺激とは異なり、竹村⁴⁾は遊泳摂餌音に優る集魚音はないという見解を示した。これは摂餌音放声による養殖生簀内のマグロ⁵⁾・ブリ⁶⁾などの誘引実験で、その効果が確かめられている。

このように、音響による魚群制御技術は実用化に向けて研究開発が進められているが、魚の摂餌音のような自然界に存在する音の解明に関しては周波数解析を用いたものがほとんどであり、波形の特徴の一部である周波数特性のみが重要視されてきた。本来音圧の時間的変化として測得された波形は、時間軸上での解析がその特徴を捉える第一段階であると考え、本研究では魚群が発する遊泳音の時間軸上での波形の特徴を明らかにすることを目的とし、高密度の魚群が遊泳する養殖生簀内において水中音を収録して、時間軸上での遊泳音の特徴について検討した。また特異的波形である遊泳音を周波数解析するにあたり、その解析上の問題点も共に示した。

方 法

収録は Fig. 1 に示すように、鹿児島湾々奥海域北部の鹿児島県始良郡隼人町沖合に設置されている城山合産株式会社隼人養殖場海上生簀で行った。養殖生簀内における遊泳音収録

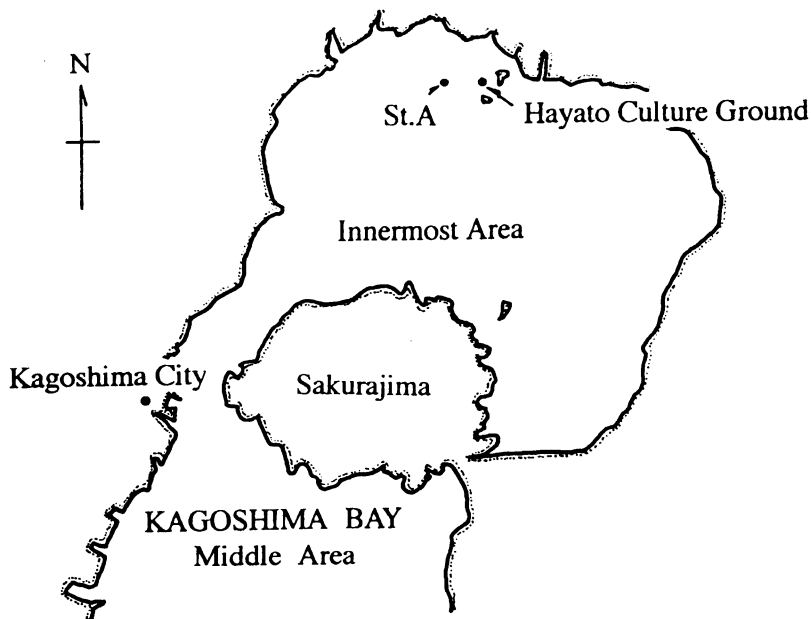


Fig. 1 Location of culture ground where the measurements of underwater sounds were carried out in the netting cages and observed station of Ambient Noise. (St. A)

実施時期は、水温が高く魚群遊泳活動が活発な夏期（平成4年9月10日, 13日, 18日, および27日）を選び、周辺海域の水中音収録は13日, 生簀での収録の合間に実施した。収録に際しては投餌終了1時間後および無投餌日の海面に波がなく, 付近航行船舶や投餌作業船が存在しない時間帯を選んだ。当養殖場の生簀構造は, スチロール製フロートをつけた1辺15mの丸型鋼管製枠に深さ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推進30~60mの海底に固定されていた。対象魚種はマダイ *Pagrus major*, プリ *Seriola quinqueradiata*, ヒラマサ *Seriola lalandi*, カンパチ *Seriola dumerili*, およびトラフグ *Takifugu rubripes* とし, Table 1 に示した。

水中音の収録システムを Fig. 2 に示した。収録は, ハイドロホン (ST1020 OKI) により水中音圧変化を検出し, 船上の水中音圧計 (SW1020 OKI) のプリアンプで増幅してデータレコーダ (RD-101 TEAC) に収録した。なおハイドロホンは, 生簀中央に設置されたフロート直下4mに懸垂できるようにハイドロホンコードを20cmの紐でフロートに繋ぎ, コードにより魚の遊泳行動に影響を与えないように心掛けた。また周辺海域の水中音収録は, 養殖場から約1海里西方の海上 (Fig. 1, St. A) で同じくハイドロホンをフロートの浮力により水深4mに支持して実施した。収録時間はそれぞれ5分間とした。また収録に先立ち, 水中音

Table 1 Fishes measured the swimming sounds in a netting cage at the culture ground.

Species	Body weight (g) (mean)	Number (mean)
<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>Takifugu rubripes</i>	600	5,000

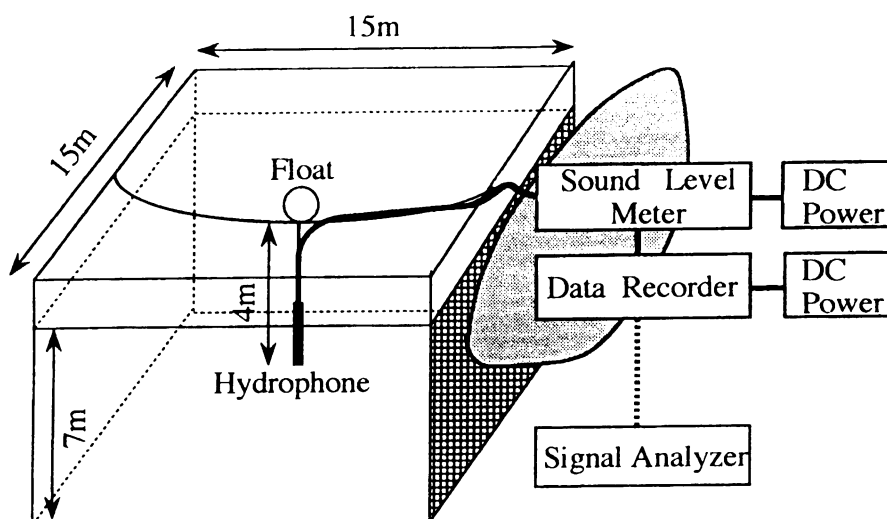


Fig. 2 Measuring system of underwater sounds.

圧計から実効値 1V, 周波数 1kHz の基準信号を発生させて記録し, 分析に際し絶対音圧値を求めた。ここでは全て $1\mu\text{Pa}$ を音圧の基準値として dB 表示した。なお交流電源ノイズを防止するため, 測定システムはすべて直流電流を用いた。

データレコーダに収録した信号は後日再生して, 信号解析装置 (SA-74 RION) により各魚種ごとの連続時間波形による比較を行った。さらにその連続時間波形の中から特徴的な波形を含む区間を取り出し, そのスペクトル解析を行った。さらに各生簀内の水中音について中心周波数 16Hz~16kHz の平均 1/3 オクターブ分析 (平均化回数100回, 計測時間約3分間) を行い, 魚種別の養殖生簀内水中音の周波数特性を求めた。

結 果

周辺海域と各魚種ごとの養殖生簀内水中音を 3.6sec の連続時間波形として取り込み, 80 msec ごとの45区間に分割して振幅同スケールで3次元表示したものが Fig. 3 である。なおここでは, サンプリング点数1024点を周波数解析区間とし1フレームと呼ぶことにした。

Fig. 3 において 1. Ambient Noise に示すように周辺海域の水中音時間波形は平坦で, 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時間波形には大別して, 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観測された。Fig. 3-2~5 に見られるように, 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 であった。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みられた。しかし, トラフグが養殖されている生簀では前者のみが観察され, 後者の特徴をもつ波形は見られなかった。

そこで, Fig. 3-2~5 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. 4 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, すべての生簀内で見られる波形 a を含むフレーム (Fig. 4-a) 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 (Fig. 4-b~e) 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フレームの抽出分析結果であり, 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。しかし, 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, およびマダイのそれでは 175Hz であった。なお Fig. 4-b には Fig. 4-a で見られた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 Fig. 4-c よりも 20dB 高くなった。

次に, 魚種別養殖生簀内および周辺海域水中音の3分間の平均 1/3 オクターブ分析結果を Fig. 5 に示した。極大周波数について見るとブリで 64Hz, マダイで 160Hz であった。これらは Fig. 4 のそれぞれの魚種によく似た極大周波数を示した。一方トラフグでは, 顕著な極大周波数は測得できなかった。また, 全生簀内の 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, 周辺海域では中心周波数 1kHz 以上におけるレベル増加は見られず, 4kHz 以上では生簀内よりも約 10dB 低い値を示した。逆に, トラフグでは 1kHz 以下のレベルが周辺海域の水中音よりも低くなった。また, 周期の長いパルス状波

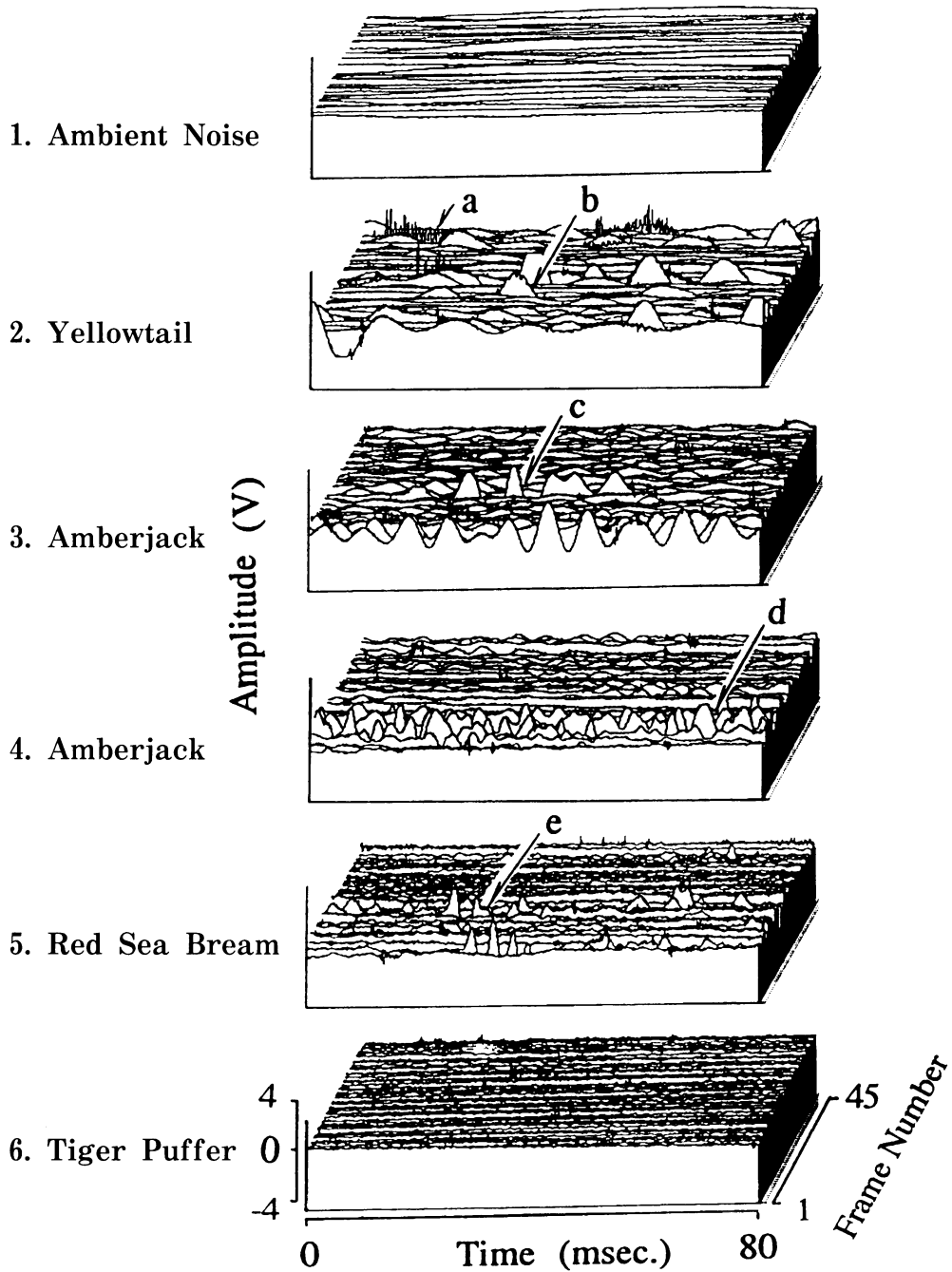


Fig. 3 Multiframe wave forms of underwater sounds in a netting cage:
 1. Ambient Noise (station A), 2. Yellowtail *Seriola quinqueradiata*,
 3. Amberjack *Seriola dumerili*, 4. Amberjack *Seriola lalandi*,
 5. Red Sea Bream *Pagrus major*, 6. Tiger Puffer *Takifugu rubripes*,
 and (a-e) Wave forms of the typical underwater sounds.

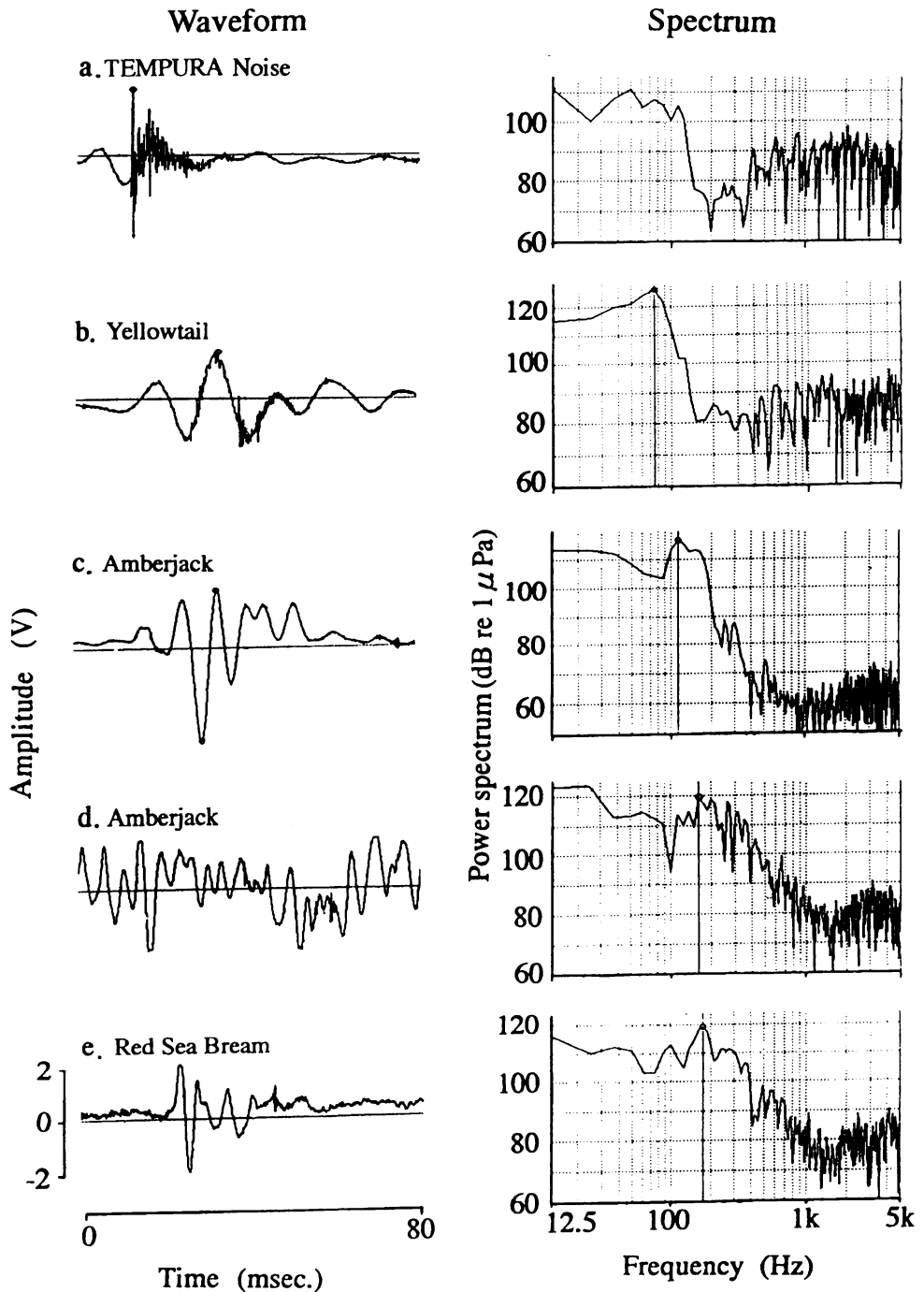


Fig. 4 Wave forms of the typical underwater sounds and then Power spectrum analyses and maximum frequency. (o):
 a. TEMPURA Noise, b. Yellowtail *Seriola quinqueradiata*,
 c. Amberjack *Seriola dumerili*, d. Amberjack *Seriola lalandi*, and
 e. Red Sea Bream *Pagrus major*.

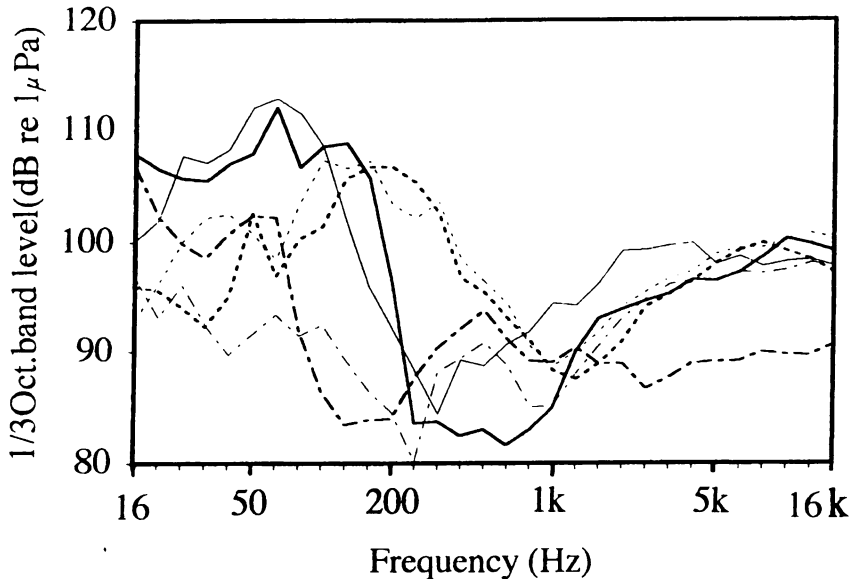


Fig. 5 One third octave band analyses of the underwater sounds in a netting cage at Hayato culture ground:

Ambient Noise (station A) -----, Yellowtail *Seriola quinqueradiata* ———, Amberjack *Seriola dumerili* ———, Amberjack *Seriola lalandi* -----, Red Sea Bream *Pagrus major* -----, and Tiger Puffer *Takifugu rubripes* -----.

形をもたないトラフグを除き、生簀内 1/3 オクターブバンドレベルの分布は主極大周波数と 1kHz 以上の高周波成分との境界付近約 200Hz~1kHz にレベルの低い凹状分布を示した。

考 察

従来のようなフレームごとの周波数解析結果を平均化して得られた結果 (Fig. 5) に示すように極大周波数は、Fig. 4 に示す特徴的な波形が含まれる 1 フレームの極大周波数とほぼ一致する。竹村⁸⁾は、魚の遊泳音の極大周波数は 1kHz 以下であることを示しており、今回測得された散発的に出現するパルス状波形の周波数特性も 1kHz 以下であったことから、この波形が魚の遊泳音に起因すると考えた。また竹村⁸⁾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. 3 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。

一方 Fig. 3-2 に示す波形 a は、パワーの差はあるが生簀内外、魚の有無にかかわらず全ての時間波形に存在する。これは一般にテンプラノイズと呼ばれ、周波数特性が 7kHz 以上の高周波域までにもなる、浅海の海底に生息するテッポウエビが発する打撃音だと言われている⁷⁾。

生簀内の遊泳音について山田⁹⁾が行った研究では、遊泳音の主極大周波数はブリでは 100 Hz 付近に、副極大周波数は 500Hz 付近に存在し、その周波数成分は数 kHz にまで広がって

いることを示した。また松野ら¹⁰⁾は、同海域で魚群遊泳中の養殖生簀内の水中音を測定し、マダイでは80~125Hzに、カンパチでは63~80Hzに主極大周波数が現われ、1.6kHz~2kHzに副極大周波数をもつことを報告した。さらに松野、山中¹¹⁾は、ブリの稚魚(4~5cm)では63~125Hzに主極大周波数が現われることを示し、160Hz付近で急激に減少しその後6.3Hzに副極大が存在することを示した。

今回の結果も含め、このような生簀内における遊泳音の周波数解析結果の共通点は、100Hz付近に極大をもち、いったん減少した後、再び1kHz以上の高周波域に極大を持つ凹状分布を示すことである。このような共通点をFig.4に示す遊泳音の周波数解析結果から検討すると、魚種による凹状分布形状の相違は、強力な遊泳音として生じる主極大周波数の高低とテンプラノイズの有無に影響されるものと推定する。すなわち強力な遊泳音を持たないトラフグでは、テンプラノイズによる高周波成分だけが存在し、逆にテンプラノイズが存在しない周辺海域では高周波成分が低く、明確な凹状分布を示さない。

以上より、音圧変化としてとらえた遊泳音は、マダイの場合その聴覚特性のうち最も優れた周波数(200Hz)¹⁾よりも低周波側に片寄って存在した。これより、現在音響馴致場で利用されている周波数(300Hz)の人工音は、遊泳音やテンプラノイズによる高密度魚群内の周波数特性の凹状帯に位置し、聴覚的に優れた音であり刺激音としては有効であろうが、魚群が常に聞いている遊泳音とは周波数を異にする。

また、遊泳音の他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変化するものに関しての解析は、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今後必要である。

要 約

高密度魚群の発する遊泳音の特徴を調査するため、鹿児島県始良郡隼人町沖合に設置されている城山合産株式会社隼人養殖場海上生簀にて水中音の測定を行った。対象魚種はマダイ *Pagrus major*, ブリ *Seriola quinqueradiata*, ヒラマサ *Seriola lalandi*, カンパチ *Seriola dumerili*, トラフグ *Takifugu rubripes* であった。

その結果、散発的に現われる魚種に異なるパルス状波形が観察され、周波数解析を行った結果、1) 50~400Hzの周波数成分を主とする高密度魚群内の遊泳音、2) 500Hz以上の高周波成分を主とするテンプラノイズが明らかになった。また、両波形の存在によりその境界付近約200Hz~1kHzにはパワースペクトルの凹状帯が存在した。なお、刻々変化する周期持続時間等の解析には時間軸上での解析が必要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、城山合産株式会社に大変御協力頂いた。また、城山合産株式会社隼人養殖場々長の今原勇氏ならびに職員の方々には、生簀内の水中音収録に当たって直接の手伝いならびに助言を頂いた。ここに深く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Y. Hatakeyama (1989) : Masking Effect on the Hearing of Red Sea Bream, *Pagrus major*, by Ambient Noise. *Int. J. Aq. Fish. Technol.*, **1**, 271-277.
- 2) 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. 大分県水試調研報, **14**, 29-39.
- 3) 中村幹雄, 小谷弘行 (1989) : 島前湾海洋牧場開発事業. 島根県栽培漁業センター事業報告書, 38-46.
- 4) 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.
- 5) 赤松友成, 島山良己, 林田仁志, 沼口隆之 (1993) : 養殖マグロの採餌音・エンジン音に対する反応行動. 日本水産学会春季大会講演要旨集 (平成5年4月, 東京) pp. 27.
- 6) 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 (I). 漁船研究技報, **19** (3), 1-12.
- 7) A. Takemura and K. Mizue (1968) : Studies on the underwater sound-1 ; on the Underwater Sound of *Genus Alpheus FABRICIUS* in the coastal sea of Japan. *Bull. Fac. Fish. Nagasaki Univ.*, **26**, 37-48.
- 8) 竹村 陽 (1984) : 水族の発生音. 海洋科学, **16** (5), 290-296.
- 9) 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.
- 10) 松野保久, 藤枝 繁, 鄭 龍晋, 山中有ー (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). (印刷中)
- 11) 松野保久, 山中有ー (1986) : 鹿児島湾における水中音についてーII. 鹿児島大学水産学部紀要, **35**, 129-132.