



Title	うしお丸に起因する水中音の解析
Author(s)	藤田, 伸二; FUJITA, Shinji; 山本, 勝太郎 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 39(4), 286-296
Issue Date	1988-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24011
Type	departmental bulletin paper
File Information	39(4)_P286-296.pdf



うしお丸に起因する水中音の解析

藤田伸二*・山本勝太郎**
梨本勝昭**・佐藤修**

Analysis of Underwater Noise Caused by the USHIO-MARU

Shinji FUJITA*, Katsutaro YAMAMOTO**, Katsuaki NASHIMOTO**
and Osamu SATO**

Abstract

In spite of many studies of fish response to sound stimula, there are few reports investigating the relationship between intensity of sound stimula and underwater ambient noise. When fishing boats are operating or passing over the fishing ground, shipping noise is the major component of ambient noise near the seashore.

It is assumed that the engine noise of the USHIO-MARU imposes on the ambient noise the typical sound pattern, which is of interest here.

In order to extract the desired signal, underwater sound was converted into its voltage values using hydrophones, which were hung alongside the USHIO-MARU, and a data recorder. In the laboratory, these values were entered into an A/D translator as equally spaced digital data. Then the process of numerical filtering was adapted to them.

As we were able to isolate the cycle of the engine from the background sound pattern, such methods seem to be fairly effective.

緒言

魚群の音刺激に対する反応について調べた実験結果の報告¹⁻⁸⁾は多数あるが、その報告の多くは、音刺激と背景雑音との関係について十分論じていない。特に、沿岸域で行われる野外実験では、背景雑音の発生要因が複雑であり海況条件によって騒音レベルが変化するとされている⁹⁻¹²⁾。そのため両者を同時に解析することは非常に困難であり、背景雑音の詳細な解析が行われていないのが実情である。

魚の行動に影響を与える低周波数帯域において、船舶騒音、特に漁場で操業中あるいは往来する漁船の発する海中騒音は非常に大きく、背景雑音の主要因の一つとなっている。そこで、漁船に起因する背景雑音の解析方法を確立するため、北大水産学部の小型調査船うしお丸を騒音源の一つとして、ハイドロホンを通して得られた水中音の中からエンジンの振動に起因する船舶騒音を抽出し、その数値的な解析方法について検討した。

* 北海道立工業技術センター
(Hokkaido Industrial Technology Center)

** 北海道大学水産学部漁具設計学講座
(Laboratory of Fishing Gear Engineering, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

実験方法

水中音の集録は、図1に示す海域、白尻港から18 kmの地点、水深約100 mにおいて、1983年7月8日、9日の2日間行った。図2に示すように、漂泊中のうしお丸を用いて行った。うしお丸の総トン数は、107.85 トン、全長25.22 m、全幅5.6 m、主機馬力および補機馬力はそれぞれ400 ps/1000 rpm、87.5 ps/1000 rpmである。その左舷側より、3個の hidroホン(沖電気工業 K.K. 製 ST-8002)を沈子を付けたロープに沿わせて5 m、10 m、15 mの位置に垂下した。

水中音は、次の点を考慮して最適な録音レベルでデータレコーダーにFM変調して録音した。実験を行った海況条件は、低気圧の去った直後であり風力3、波浪2であったので、波浪による海面の上下動が大きくその影響を減少させるため、プリアンプ付属のハイパスフィルターを用い、また数値化におけるナイキスト周波数以上の高周波成分を取り除くため、メインアンプ付属のローパスフィルターを用いた。さらに、うしお丸の電源を用いた場合の電氣的なノイズの影響を避けるため電源にはバッテリーを用いた。

集録した水中音は、実験室において再生し、コンピュータによりA/D変換した。数値化にあたり、エンジンの振動に起因する船舶騒音の中で、音響エネルギーの大きい周波数範囲は1 kHz以下なので、解析を行う周波数範囲を0~1 kHzに限定し、サンプリング周波数を2 kHzとした。実験に用いた主機の最小回転数は600 rpmであるから、回転数と関連した変動成分を20波長以上得

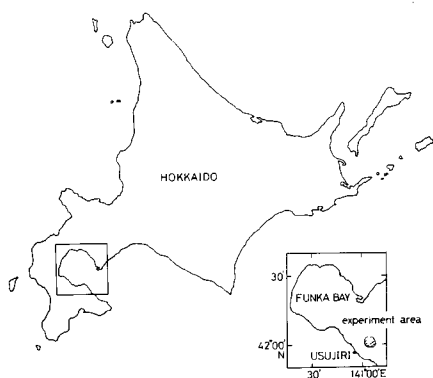


Fig. 1. Map showing experimental area.

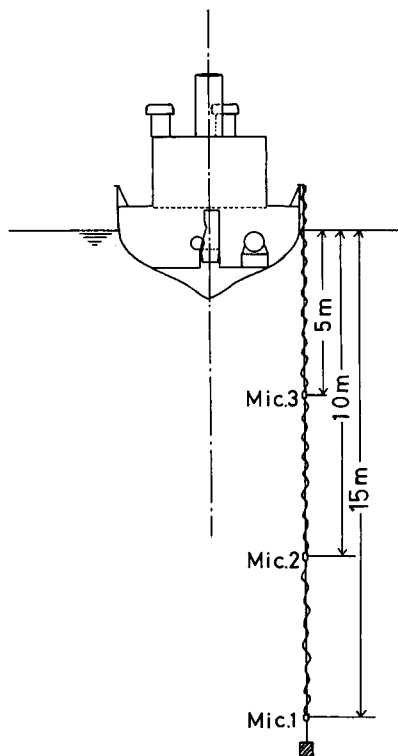


Fig. 2. Schematic illustration of USHIO-MARU and position of hydrophone.

るためには、2 秒間以上のデータを取り込む必要があり、各チャンネル毎に 5000 個のデータを数値化し、フロッピーディスクに書き込んだ。

数 値 解 析

船舶騒音は、波浪等に起因する背景雑音が付加され、広帯域な周波数成分をもつ水中における圧力変動としてハイドロホンによって電圧値に変換され、不規則振動過程として実現される。

そこで、船舶騒音の特徴を明らかにするためには、数値化された水中音を周波数領域で検討し、得られた特性をもとに、実現値としての時間領域での原波形から、求める信号成分のみを抽出するのが効果的な方法であると考えられる。うしお丸のエンジンの回転数と一致した信号を得るために、次のような数値フィルターを採用した。

数値フィルター

線型振動系において、入力と出力の間の周波数応答関数を $H(\omega)$ としたとき、そのインパルス応答関数 $h(t)$ は

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1)$$

により与えられる。ここで ω は角周波数である。 $H(\omega)$ を任意に定めることにより不規則振動過程の実現値としての入力 $S_i(t)$ から有効な周波数成分を

$$S_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) S_i(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

により抽出することができる。ここで $S_0(t)$ は線型系の出力である。集録した水中音の原波形を $S_i(t)$ とした時、 t は有限であり、一定の時間間隔 Δt で数値化することにより、 $S_i(t)$ は離散値となる。

水中音の原波形を離散値として取り扱おうと (2) は

$$S_{0, m} = \sum_{n=-N}^N h_n S_{i, n+m} \quad (3)$$

となり、(1) は

$$h_n = \frac{1}{2\pi f_s} \int_{-\pi f_s}^{\pi f_s} H(\omega) e^{-i\omega n/f_s} d\omega \quad (4)$$

となる。ここで、 $f_s = \frac{1}{\Delta t}$, $-\frac{\omega_s}{2} \leq \omega \leq \frac{\omega_s}{2}$, $\omega_s = 2\pi f_s$ である。

したがって、 h_n はたたみ込み積分 (1) における周波数応答関数 $H(\omega)$ を実現する重み関数である。

解析に用いた数値フィルターのカットオフ周波数 ω_c とリジェクト周波数 ω_r の間を直線で結ぶとフィルタリング処理を行ったとき不連続性による誤差を生じるので、両端を曲線で結んだ。この種のフィルターについては Ormsby¹³⁾ が、設計例を上げて論じているので、それに従って、方程式 (1) により Δt を用いて $t_n = n\Delta t$, $\Delta t = 1/f_s$, $\lambda_R = \Delta\omega/f_s$ として積分、変換を行ない

$$h_n = h(t_n)\Delta t = A/B \quad (n = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N) \quad (5)$$

$$A = \sin 2\pi n(\lambda_c + 0.9\lambda_R) + \sin 2\pi n(\lambda_c + 0.1\lambda_R) - \sin 2\pi n(\lambda_c + \lambda_R) - \sin 2\pi n\lambda_c$$

$$B = 0.36\lambda_R^2(\pi n)^3$$

とし、 $n=0$ に関しても同様に、方程式 (1) より

$$h_0 = 2\lambda_C + \lambda_R \quad (6)$$

とした。ここで、 $\lambda_C = \omega_C / \omega_S$ 、 $\lambda_R = (\omega_T - \omega_C) / \omega_S$ 、 $\omega_S = 2\pi / \Delta t$ である。

さらに重み関数の個数 N は、ロールオフの鋭さを示す λ_R と関連し、フィルタリングの誤差を 1% 以下にするため

$$\lambda_R N = 1.5 \quad (7)$$

なる関係を用いて決定した。

二乗エンベロープ検波

搬送波 S_1 と変調波 S_2 の周波数を ω_{S1} と ω_{S2} とすると、 $\omega_{S1} \ll \omega_{S2}$ という条件下で得られる振幅変調波 $S_1 S_2$ を

$$V(t) = S_1(t) S_2(t) \quad (8)$$

とすると、その二乗は

$$V^2(t) = S_1^2(t)/2 + S_3(t) \quad \omega_{S1} \ll \omega_{S3} \quad (9)$$

となる。従って S_1 を抽出するためには、 $V(t)$ を二乗して $V^2(t)$ を得、高周波数成分 S_3 を取り除いて 2 倍し、さらに $1/2$ 乗すれば求めることができる。

特定の周波数成分の音がエンジンの周期と一致して強弱を繰り返しているとする、得られた水中音の中に、エンジンの周期と一致する信号 S_1 によって振幅変調された狭帯域信号 S_2 の形で出現すると考えられる。しかし、実際には、他の周波数成分のノイズ S_5 が加わっているので

$$F_1 = S_1 S_2 + S_5 \quad (10)$$

となる。ここで $\omega_{S1 S2} = \omega_{S2}$ とし、複数個の周波数成分から成り立つ S_5 の周波数 $\{\omega_{S5}\}$ において、 $\{\omega_{S5}\} < \omega_{S1 S2}$ あるいは $\{\omega_{S5}\} > \omega_{S1 S2}$ とする。

F_1 は電気的なフィルターによる集録時の前処理を行っていない水中音であるから、前処理後の水中音は

$$F_2 = S_1 S_2 + S_4 \quad (11)$$

となり、この水中音をデータレコーダーに集録して、数値化後一連の数値処理を行った。 F_2 からバンドパスフィルターを用いて抽出した信号 $S_1 S_2$ を

$$F_3 = S_1 S_2 \quad (12)$$

とし、 F_3 を二乗することにより

$$F_4 = S_1^2/2 + S_3 \quad (13)$$

を求め、ローパスフィルターを用いて S_3 を取り除き、さらに 2 倍して $1/2$ 乗することにより求

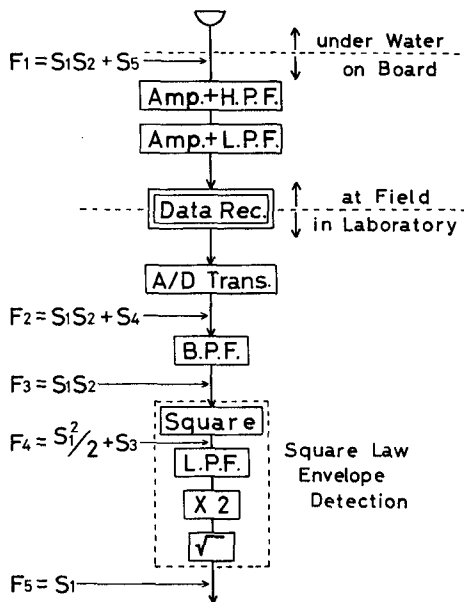


Fig. 3. Block diagram of the numerical filtering process.

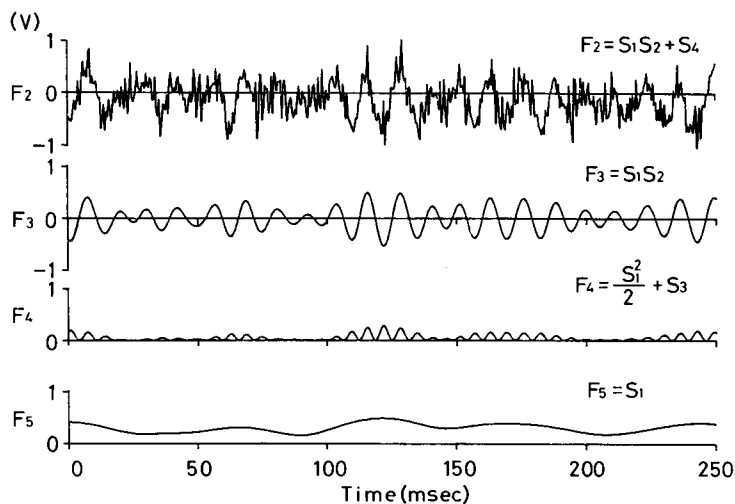


Fig. 4. Sound wave forms from the numerical filtering process F_2, F_3, F_4 & F_5 versus time.

める振幅変調信号

$$F_5 = S_1 \quad (14)$$

を抽出することができる。この振幅変調信号の抽出処理過程のブロックダイアグラムを図3に示し、信号の途中の形状を図4に示す。

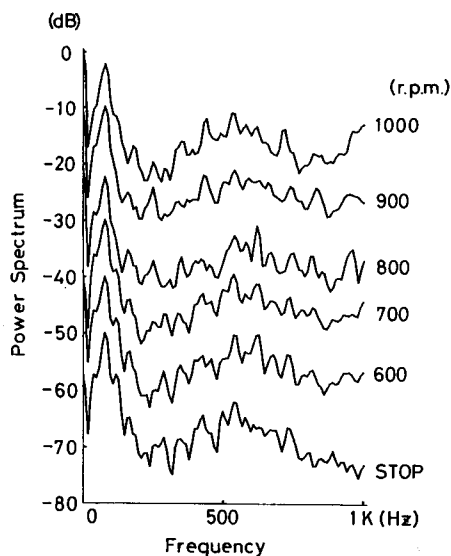


Fig. 5. Relations between the spectrum of underwater sound and frequency. The numbers show revolution of main engine per minute and the "stop" refers to the state of main engine shut down. The revolutions of the sub engine are always 1,000 rpm. Each spectrum expresses values relative to the maximum value, each maximum decreasing by 10 dB.

結果および考察

水中音のスペクトルの特徴

図5は、サンプリング周波数 2 kHz, 2.5 秒間のデータを用いて計算した^{14,15)}、水中音のパワースペクトルである。主機の回転数をパラメータにして描き、比較のため主機を停止した状態でのスペクトルも描いた。主機の回転数の減少と共にエネルギーは減少する傾向にあるが、パラメータとは無関係に共通した周波数帯にピークを持つ形状を示した。80 Hz と 500 Hz 前後にエネルギーの高い周波数帯が存在し、80, 180, 350, 530, 710, 830 Hz の周波数帯では、線スペクトルの存在が示唆されている。さらに、830 Hz の周波数帯では、主機を停止した状態ではみられない線スペクトルが現れている。しかし、エンジンの回転数を変化させても周波数との関係を示す特徴は何も存在しない。なお、電

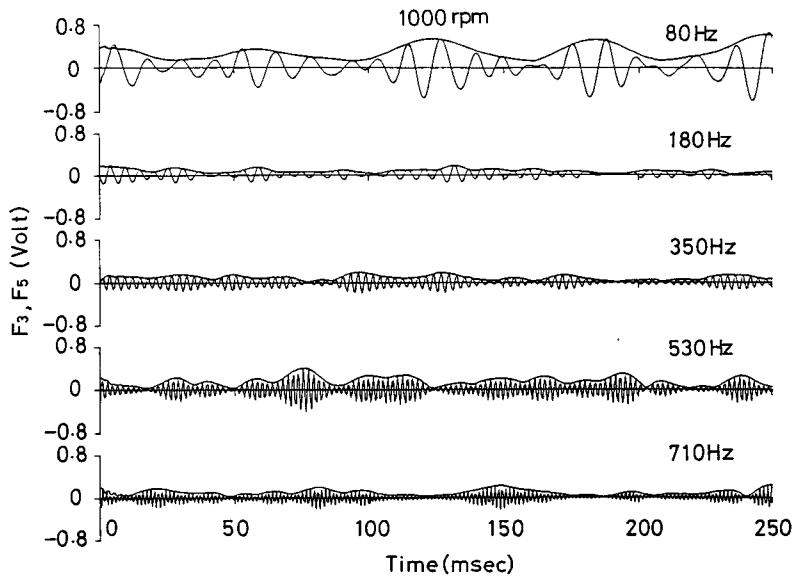


Fig. 6. Shows the patterns of F_3 & F_5 versus time, as a result of filtering.

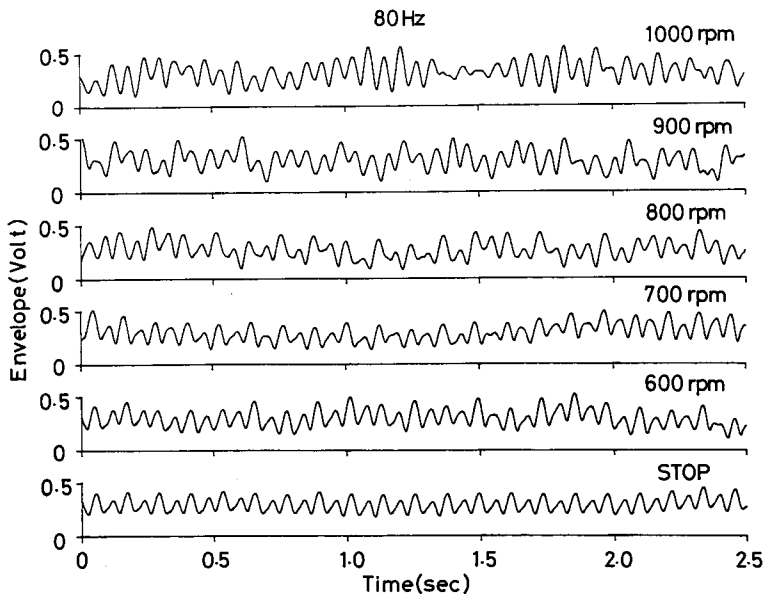


Fig. 7. Relations between envelope and time in the various revolutions of the main engine with central frequency of 80Hz.

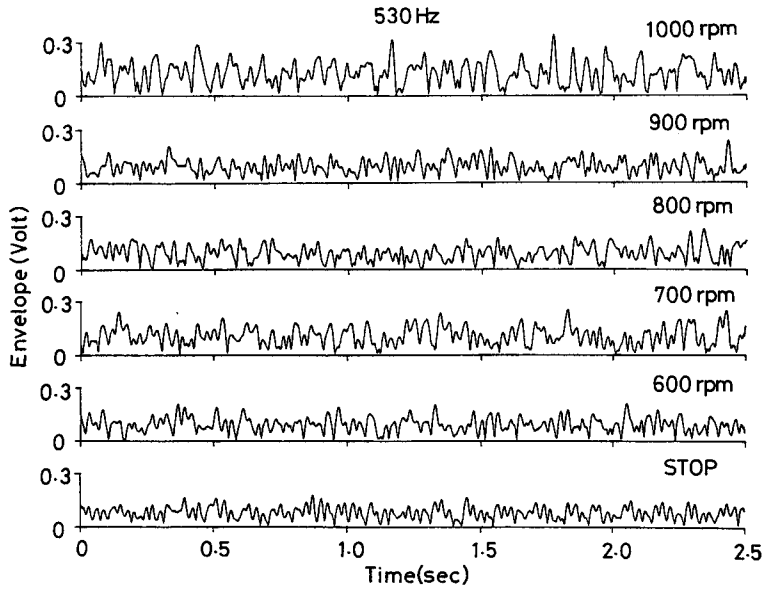


Fig. 8. Relations between envelope and time in the various revolutions of the main engine with central frequency of 530Hz.

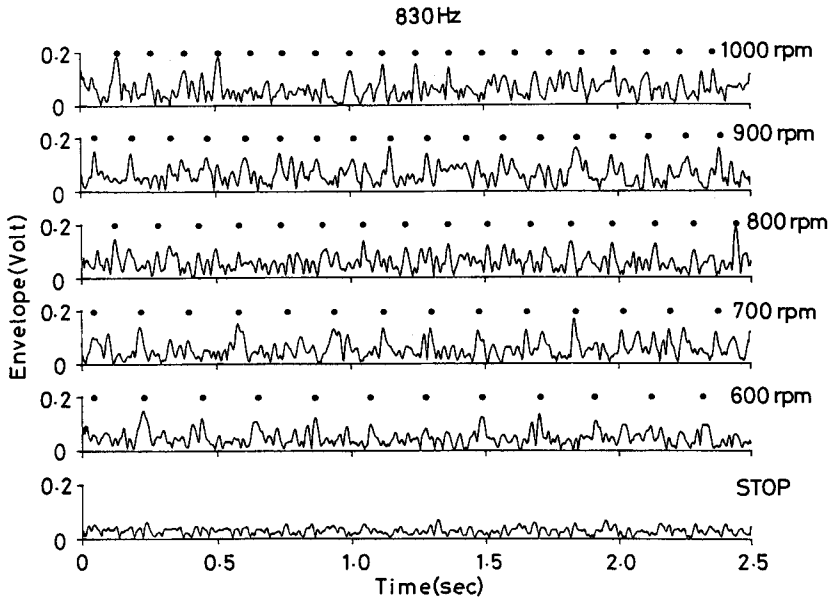


Fig. 9. Relations between envelope and time in the various revolutions of the main engine with central frequency of 830Hz. ● marks show each cycle's relation to the revolutions of the main engine.

氣的なハイパスフィルターを用いて集録したにもかかわらず、波浪等の影響による低周波成分が残っている。

二乗エンベロープ検波

図6は、図5におけるスペクトルの形状にしたがって、数値フィルターのパラメータを選択し、計算した F_3 と F_5 について描いた図であり、振幅変調信号 S_1 と振幅変調波 $S_1 S_2$ の周波数 ω_{S_1} と $\omega_{S_1 S_2}$ は明らかに異なっており、二乗エンベロープ検波が有効になされることが解る。

しかし、80 Hz においては F_3 と F_5 の周波数が近い為、 F_3 と F_5 を完全に分離していない部分も若干見られるが、振幅変調信号の周期の決定には問題がない。さらに、得られた 5000 個のデータの始まりと終わりの両端ではそれ以前の値とそれ以後の値を用いることが出来ないので変動している。振幅変調信号 S_1 は周波数毎に異なる傾向を示すので、時間軸を圧縮した形で、振幅変調信号を検討する必要がある。

図7, 8, 9 は 80 Hz, 530 Hz, 830 Hz の周波数帯について、主機の回転数の違いによる振幅変調信号を併記したものであり、80 Hz については、回転数とは無関係に同じ傾向を示すが、はっきりとした周期性を持っており、補機の回転数 1000 rpm の周期と一致している。530 Hz については、主機を止めた状態での補機の回転数の 2.5 倍の周期を持っており、主機の回転数を変化させても類似した傾向を示している。以上の事から、この周波数帯の水中音は補機に起因しており、同時に主機の回転数の増加にもなって主機からの雑音が増加するため、補機の回転数に一致した周期性を減少させていると考えられる。830 Hz については、●印で示すように主機の回転数に一致する周期性を示す。530 Hz の周波数帯とは逆に、主因は主機であり、補機からも雑音が発生しているため、周期性を不明瞭にしていると考えられる。

図10は、主機、補機共に 1000 rpm 時における、80, 530, 830 Hz の周波数帯の振幅変調信号を示している。●印は補機に起因する 80 Hz の周期を示し、○印は主機に起因する 830 Hz の周期を示している。両周期を基準に 530, 830 Hz の信号を比較すると周期がずれており、この信号の周期

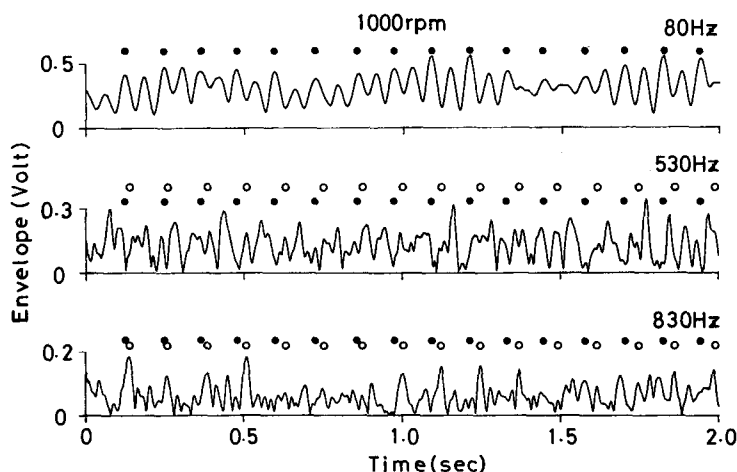


Fig. 10. Relations between envelope and time in the various central frequencies, with revolutions of main and sub engine of 1000 rpm. ● marks show each cycle's relation to the revolutions of the main engine and ○ marks show the cycle's relation to the revolutions of the sub engine.

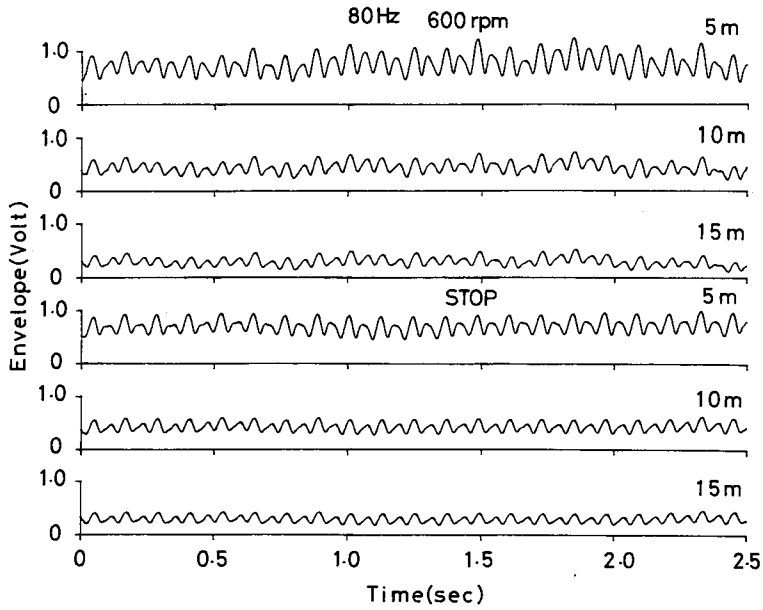


Fig. 11. Relations between envelope and time at the various depth settings of the hydrophone : the revolutions of main engine are 600 rpm, the main engine is shut down, and the central frequency is 80Hz.

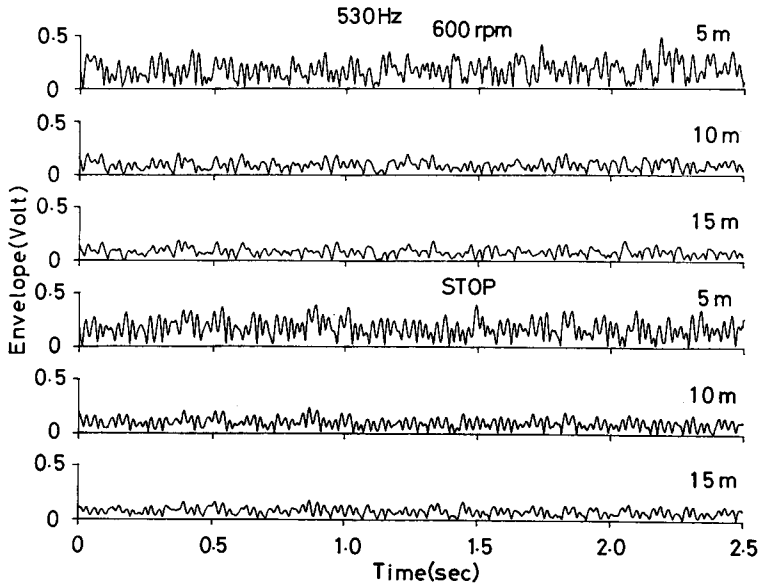


Fig. 12. Relations between envelope and time at the various depth settings of the hydrophone : the revolutions of main engine are 600 rpm, the main engine is shut down, and the central frequency is 530 Hz.

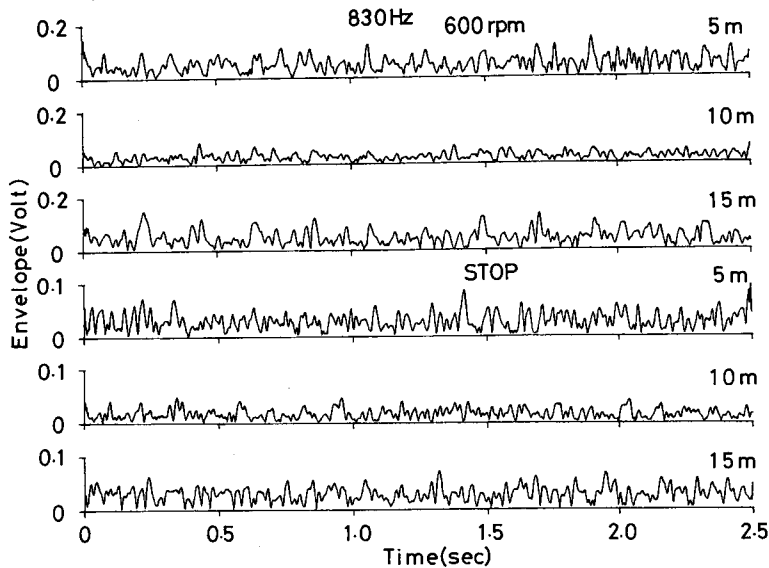


Fig. 13. Relations between envelope and time at the various depth settings of the hydrophone: the revolutions of main engine are 600 rpm, the main engine is shut down, and the central frequency is 830 Hz.

から求めた回転数から判断すると、実際には主機および補機の回転数が等しく設定されていなかったものと推測される。

図 11, 12, 13 は、主機の回転数を 600 rpm にした時と主機を停止した時の、ハイドロホンの設置深度 5 m, 10 m, 15 m における振幅変調信号を示している。深度の増加と共に振幅変調信号は減衰するけれども、傾向はよく一致しており、相関関数を用いた音源方向の探知の可能性を示している。ここで、ハイドロホンは同一規格の製品を用いて実験を行ったので、感度は等しいとして解析を行ったが、実際には異なっており、感度に関する補正を行って音響エネルギーの減衰を測定する必要があるが、今回は周期性の抽出を検討することを目的としたので、ハイドロホンの感度については考慮していない。

以上のことから、帯域幅の異なる周波数帯の信号にもパラメータを簡単に与えることの出来る数値フィルターを用いた信号処理方法は非常に効果的であり、特に周波数領域での水中音の解析と併用して用いることにより、時間領域での解析をより詳細に行なえと考えられる。今後この数値フィルターによる信号処理法を用いて漁船に起因する背景雑音だけでなく、様々な音源の背景雑音を解析する予定である。

謝 辞

本研究を進めるに当たって、解析方法について多くの助言をいただいた北海道大学水産学部元教授川島利兵衛博士ならびに北海道大学水産学部助教授天下井清博士に謝意を表すると共に、水中音の集録に協力して頂いたうしお丸の松島寛治船長をはじめ乗組員の方々に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- 1) 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**, 1-11.
- 2) 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**, 1-5.
- 3) 間庭愛信・畠山良巳 (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, **22**, 1-5.
- 4) 小長谷康夫 (1969). フィッシュポンプを用いた魚道の研究. 日水誌, **35**, 430-433.
- 5) 間庭愛信・渡辺福松・利涉義宣・田中夏積 (1968). 音響による魚群誘致に関する試験 (サバ群の誘集について). 千葉水試報告, **10**, 1-10.
- 6) 久保治良・河崎 正・猿谷 倫 (1971). 水中音波集魚試験-2. 茨城水試試報 (1971版), 51-63.
- 7) 井上 実 (1978). 魚の行動と魚法. 211 p. 恒星社厚生閣, 東京.
- 8) Fish, J.F. and Offutt, C.O.G. (1971). Hearing Thresholds from Toadfish, *Opsanus Tau*, Measured in the Laboratory and Field. *J. Acoust. Soc. Am.* **51**, 1318-1321.
- 9) Wens, G.M. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean. *Spectra and Sources*. **33**, 1936-1956.
- 10) Piggot, C.L. (1965). Ambient Sea Noise at Low Frequencies in Shallow Water of the Scotian Shelf. *J. Acoust. Soc. Am.* **36**, 2152-2160.
- 11) ユーリック R.J. (1978). 水中音響の原理. (土屋明訳), 414 p. 共立出版, 東京.
- 12) 海洋音響研究会 (1984). 海洋音響. 256 p. 海洋音響研究会, 東京.
- 13) Ormsby, J.F.A. (1961). Design of Numerical Filters with Applications to Missile Data Processing. *J. Association for Computing Machinery*. **8**, 440-466.
- 14) 磯部 孝 (1968). 相関関数およびスペクトル. 455 p. 東京大学出版会, 東京.
- 15) 日野幹雄 (1977). スペクトル解析. 300 p. 朝倉書店, 東京.