

INPFC DOCUMENT Ser. No. 2736 Rev. No. _____ _____

音波発生器の有効距離

Effective Range of Sound Generators

高山良己

Yoshimi Hatakeyama

水産工 学 研 究 所

National Research Institute of Fisheries Engineering

1984年 2月

February, 1984

水 産 庁

Fisheries Agency of Japan

この文書を引用する場合は下記による：

畠山良己 1984. 音波発生器の有効距離. 1984年3月 北太平洋漁業国際委員会 海産哺乳動物
特別小委員会科学分科会 提出文書, 水産庁水産工学研究所, 6pp.

音波発生器の有効距離

水産工学研究所 畠山良己

1981年から低周波音波発生器(9 KHz)を、1983年から高周波音波発生器(145 KHz付近)を北洋のサケ・マス流網に取り付けて、イシイルカの羅網数を減少させる実験を行っているが、その有効距離を推定し取付個数を決める必要がある。

イシイルカの聴覚に関する実験データはないが、推定値を利用したり、他のイルカのデータで代用したりして、パルスの持続時間とマスクング周囲雑音レベルによる聴覚閾値の増加を考慮しながら、グラフからイルカが音源方向へ向いている時の有効距離を求めた。

1. 音波発生器の仕様

有効距離を求めるために必要な音波発生器の仕様¹⁾を以下に記す。

(1) 低周波音波発生器

周波数 : 9 KHz
送波周期 : 4分毎に16秒間に4パルス
パルス巾 : 100 mS
音 圧 : 40 dB at 1 m

(2) 高周波音波発生器

(a) イルカ方式

周波数 : 135 → 150 KHz (FM変調)
パルス間隔 : 28 → 7 mS
パルス数 : 0.6秒間に47個
パルス巾 : 100 μ S
音 圧 : 85 dB at 1 m

(b) 単純方式

周波数 : 145 KHz
パルス間隔 : 3秒
パルス巾 : 50 mS
音 圧 : 85 dB at 1 m

2. パルスの持続時間による聴覚閾値の変化

イルカの聴覚閾値は通常 3 秒位の長い持続時間の音波で測定しており、それが短くなれば耳の感度が悪くなる。イシイルカのデータがないが、C.S.Johnson²⁾が行ったハンドウイルカについての実験では、パルスの持続時間に対する聴覚閾値の変化は図 1 のようになっている。人間と同じようにイルカは純音刺激の感知では音響エネルギーを積分しており、 I を持続時間 t の刺激の場合の聴覚閾値の強度、 I_{∞} を非常に長い持続時間の場合の聴覚閾値の強度、 τ を時定数とすると

$$I / I_{\infty} = 1 + \frac{\tau}{t} \dots\dots\dots (1)$$

の関係式が成立する。

人間とハンドウイルカの時定数 (τ) を図 2 に示す。9 KHz では 0.15 秒で、(1) 式により 0.1 秒の持続時間では、聴覚閾値が 4 dB 増加する。145 KHz 近辺のデータがないので 100 KHz のもので代用すると、100 KHz の τ が計算されていないので図 1 のグラフから最も長い持続時間の聴覚閾値と 100 μ S、50 mS の持続時間の聴覚閾値の差から各増加量を 24 dB、7 dB とした。

人間の場合、毎秒数回以上のパルスの繰り返し音では、聴覚のエネルギー積分機能により聴覚閾値が減少している。イシイルカでも同じ現象が起るはずであり、イルカ方式では平均 18 mS 間隔でパルスを発生しているので、人間のデータから類推してその減少量を 11 dB とした。

3. 周囲雑音の影響

人間と同じようにイルカの場合も広帯域の周囲雑音が存在する水中で音を聴くとき、その音刺激の周波数の近くの比較的狭い帯域の雑音のみがマスキング効果を有する。その臨界帯域巾 (C.B.W) は連続広帯域雑音中の純音の聴覚閾値を測定することにより求められ (1 Hz 当りの雑音レベル) \times C.B.W = 絶対聴覚閾値の式から計算できるが、実際の海ではイルカの受波指向性利得の補正が必要である。

イシイルカのデータがないので、C.S.Johnson³⁾が測定したハンドウイルカの臨界帯域巾 (図 3) を利用した。9 KHz の C.B.W は 28 dB であり、100 KHz 以上の測定は行われていないが、100 KHz 付近の曲線の傾斜がゆるやかなので 100 KHz の C.B.W (40 dB) を 145 KHz の C.B.W とした。

Knudsen の風速をパラメータとした深海の平均雑音スペクトラム (NJ) から 9 KHz の NJ は海況 1 で -64 dB re 1 μ bar / Hz、海況 3 で -54 dB、海況 6 で -47 dB であり、145 KHz 付近の NJ は海況 1 と 3 で Mellen の熱雑音が優勢となり海況に関係なく -70 dB、海況 6 で -68 dB となっている。

実際にイルカが感じる雑音レベル (NL) は、周囲雑音スペクトラム・レベルを NJ、臨界帯域巾を BW、受波指向性利得を DI とすると次式で表わされる。

$$NL = NJ + BW - DI \dots\dots\dots (2)$$

W.W.L. Au⁴⁾らが報告している周囲雑音スペクトラム・レベルと実効マスキング雑音レベルの推定値からDIを計算してみると50 KHzで17 dB、145 KHzで23 dBとなったので、9 KHzのDIを50 KHzのデータを参考にして3 dBと推定した。145 KHzではNLを計算してみると海況6でもイシイルカの聴覚閾値(-45 dB)以下であり、パルスの持続時間の影響だけを考えればよい。

4. 有効距離

水平伝播の吸収損失係数は、10 KHzで4.0 dB/Km、145 KHzで37 dB/Kmとした。イシイルカの聴覚閾値は、F.T. Awbrey⁵⁾らが解剖所見から推定した値を用い、10 KHzで-36 dB、145 KHzで-45 dBとし、図4.5のように音波発生器から出された音波の距離減衰曲線及びパルスの持続時間とマスキング雑音が補正した聴覚閾値が交叉する点から有効距離(Re)を求め表1に示した。聴覚閾値を10 dB増加させ、10 dB余裕度をとった場合のReを括弧して示した。

パルス音におけるマスキング雑音と聴覚閾値の関係についてのデータがないので、海況とパルス持続時間とは各々独立した影響要因として有効距離を求めた。従って両者のデータを比較し、小さい値を実際の有効距離と考えるべきであろう。

余裕度を10 dBとした場合、9 KHzでは有効距離が40～50%に減少しているが、145 KHzでは吸収減衰が大きいため、1 Km付近の減衰曲線の傾斜が大きく87%程度になっていてその減少が少ない。

イルカが発する超音波ビームの指向性に関しては、200 KHzで4°、150 KHzで10°、100 KHzで24°、50 KHzで34°というデータ⁶⁾があり、当然受波にも指向性があるので、イルカの体軸と音波発生器のビームとの間の角度の許容範囲を広くする点からは、低周波発生器が有利である。

9 KHzにおける海況の影響は、海況1→3→6と雑音が増加するにつれて有効距離が約1/2に減少しているが、145 KHzの方はDIが大きく雑音スペクトラムレベルが小さいので、海況6でもイルカの聴覚閾値に影響を与えていない。

各パルスの持続時間と海況3で余裕度を0 dBとした時、小さい方を有効距離とすると、低周波音波発生器で1480 m、高周波音波発生器のイルカ方式で1480 m、単純方式で1600 mとなる。1個の音波発生器の有効距離は左右両方で2 Reとなり、低周波音波発生器で3.0 Km、高周波音波発生器のイルカ方式で3.0 Km、単純方式で3.2 Kmであり、330反のサケマス流網で5個取り付ける必要がある。

5. 結 言

イシイルカの推定聴覚閾値を使い、ハンドウイルカのデータから短いパルス音を聴き取ることと、周囲雑音が存在することによる聴覚閾値の増加を考慮しながら、超音波パルスの音圧レベルの距離減衰曲線と聴覚閾値レベルの交点から有効距離を求めた。

雨、強風など雑音レベルを増加させる要因があるので、余裕度を大きくしたいが、今回は余裕度を0

dBとし、海況3と各持続時間のデータから小さい方の有効距離をもとに1個の音波発生器の有効距離を3.0～3.2kmとし、必要な取付個数を5個とした。

今回はイシイルカに関する推定値と種類の異なるイルカのデータから有効距離を求めたものであり、今後はそれらをイシイルカの実測値に置き換えて正確な取付個数を算出する必要がある。

References

- 1). Hatakeyama, Y., 1983 : Study of the Dall's porpoise's echolocating pulse and specification of sound generators. Document submitted to the meeting of the Scientific Subcommittee of the Ad Hoc Committee on Marine Mammals, INPFC, Tokyo Japan, Feb., 21-25, 1983.
- 2). Johnson, C.S., 1967 : Relation between absolute threshold and duration-of-tone pulse in the bottle-nosed porpoise. J. Acoust. Soc. Am. 43(4), 757-763.
- 3). Johnson, C.S., 1968 : Masked tonal thresholds in the bottle-nosed porpoise. J. Acoust. Soc. Am. 44(4). 956-967.
- 4). Au, W.W.L. et al. 1974 : Measurement of echolocating signals of the Atlantic bottlenosed dolphin, Tursiops truncatus (Montagu), in open waters. J. Acoust. Soc. Am. 56(4), 1280-1290.
- 5). Awbrey, F.T. et al. 1979 : The bioacoustics of the Dall's porpoise-salmon driftnet interaction. H/SWRI Technical Report 79-120, Nov. 1979, Hubbs/ Sea World Research Institute
- 6). Norris, K.S. and Evans, W.E., 1966 : Directionality of echolocation clicks in the rough-tooth porpoise, Steno bredanensis (Lesson). In Marine bio-acoustics vol.2, 305-315, Pergamon Press, Oxford.

Table 1 Effective range of the sound generator

	Effective range (m)		
	9 kHz	145 kHz	
		Dolphin mode	Simple mode
Sea state 1	2300 (1200)	1760 (1530)	1760 (1530)
" 3	1480 (680)		
" 6	850 (340)		
Pulse duration 100ms	1800 (860)		
" 50ms			1600 (1400)
" 100µs		1480 (1280)	

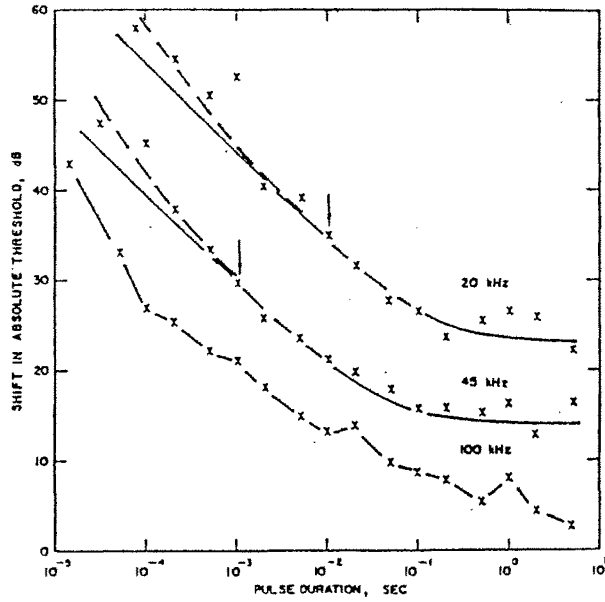


Fig. 1 Threshold versus pulse duration in the bottlenosed dolphin

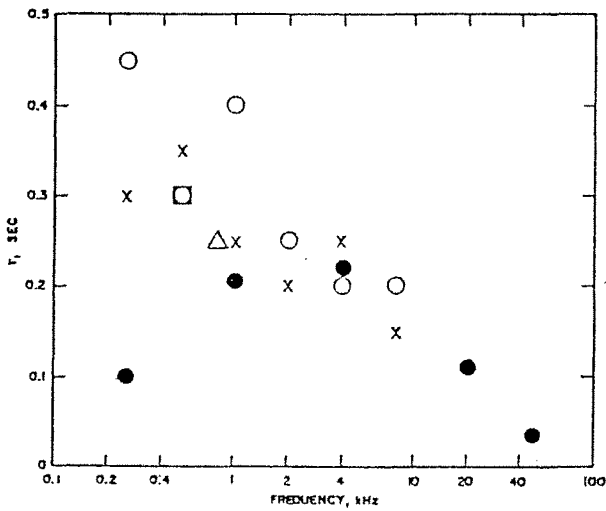


Fig. 2 Auditory time constant of the bottlenosed dolphin (closed circle) and human (other marks)

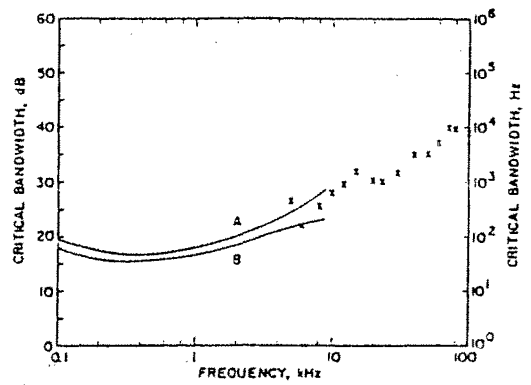


Fig. 3 Critical bandwidths of the bottlenosed dolphin (crosses) and human (A: monaural, B: binaural)

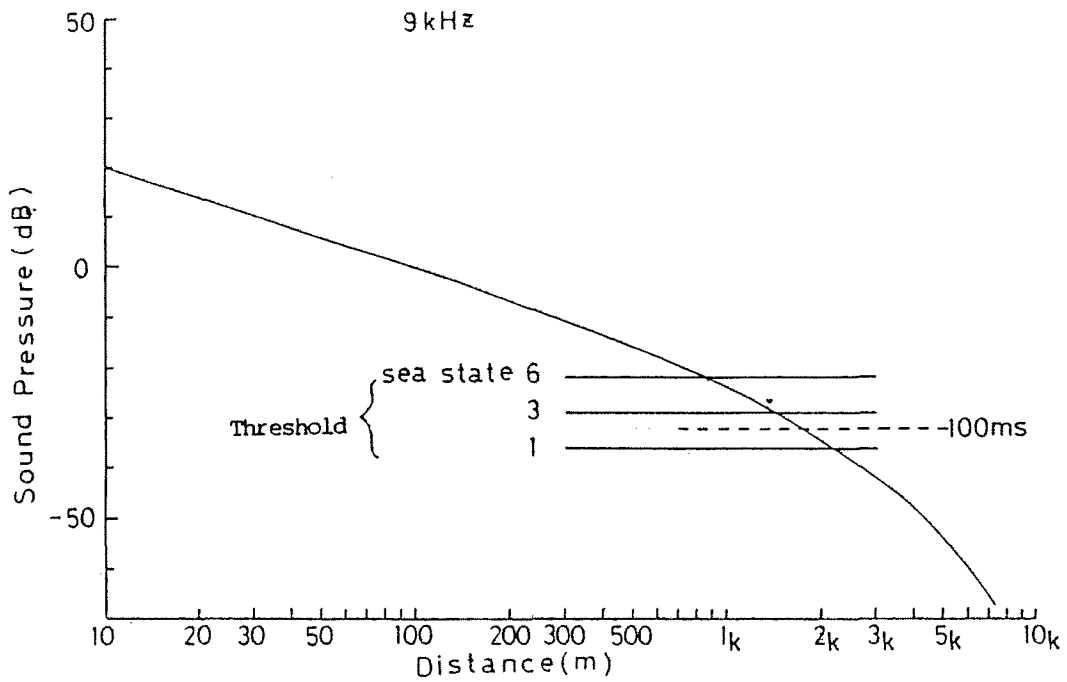


Fig. 4 Determination of effective range at 9 kHz

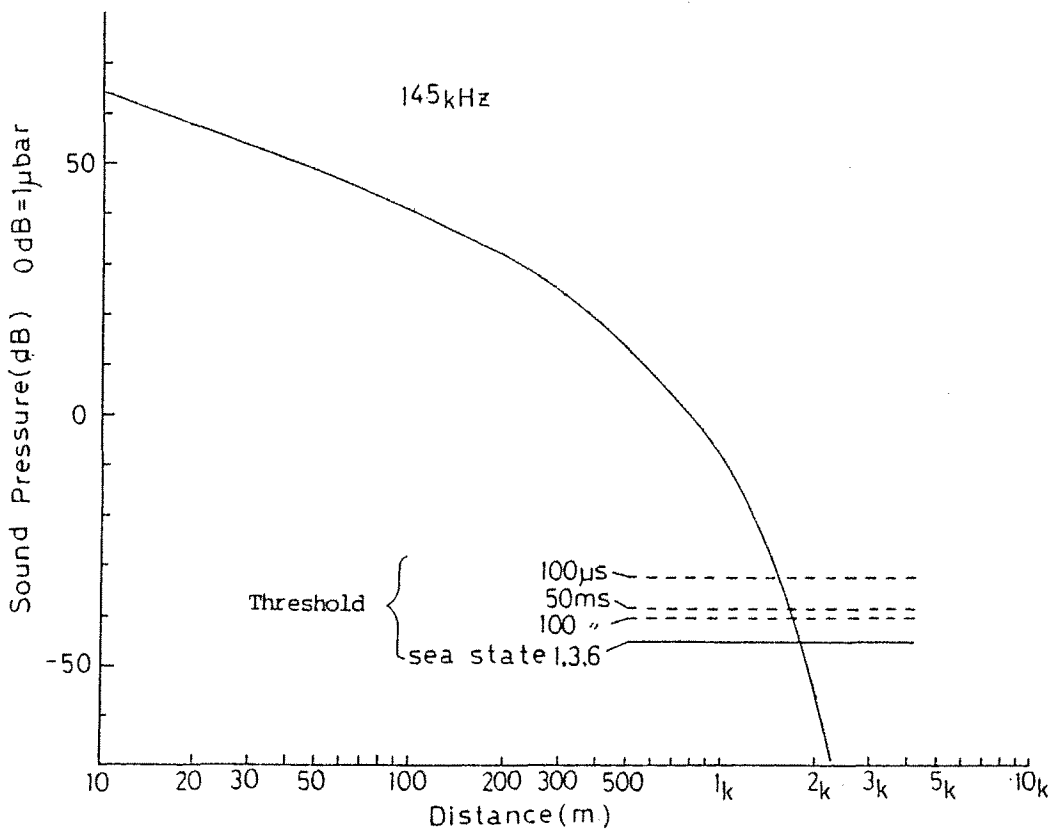


Fig. 5 Determination of effective range at 145 kHz



Not to be cited by
INPFC Document Number

INPFC
Doc. 2736
Rev. 1

TRANSLATION

EFFECTIVE RANGE OF SOUND GENERATORS

Yoshimi Hatakeyama

National Research Institute of Fisheries Engineering

Tokyo, Japan

1984 February

THIS PAPER MAY BE CITED IN THE FOLLOWING MANNER:
Hatakeyama, Yoshimi. 1984. Effective range of
sound generators. (Document submitted to the
International North Pacific Fisheries Commission,
1984 February.) 8 p. Fishery Agency of Japan,
Tokyo, Japan.

Experiments to reduce the numbers of Dall's porpoise entangled in the North Pacific salmon gillnets have been conducted by attaching to the gillnets (since 1981) low frequency sound generators (9 kHz) and since 1983 high frequency sound generators (around 145 kHz). It was necessary to estimate the effective ranges of those devices in order to determine the number to be attached to the gillnets.

There are no experimental data on audiograms for Dall's porpoise and the effective range of sound generators at times when the porpoise's head is pointed towards the sound source has been estimated using estimated values for Dall's porpoise and substituting data for other species of toothed whales. Also taken into consideration were changes in auditory threshold with changes in pulse duration and the masking of ambient noise level.

1. Design of sound generator

Specifications of the sound generators for which it was required to determine effective range are as follows--

(1) Low frequency sound generator

Frequency	9 kHz
Sound emission interval	4 pulses in 16 seconds in every 4 minutes
Pulse width	100 ms
Sound pressure	40 dB at 1 m

(2) High frequency sound generator

(a) Dolphin mode

Frequency	135 - 150 kHz (FM)
Pulse interval	Changeable from 28 ms to 7 ms
Number of pulses	47 pulses in 0.6 seconds
Pulse width	100 μ s
Sound pressure	85 dB at 1 m

(b) Simple mode

Frequency	145 kHz
Pulse interval	3 seconds
Pulse width	50 ms
Sound pressure	85 dB at 1 m

2. Change of auditory threshold by pulse duration

The auditory threshold of porpoise is usually measured by sound waves of about 3 seconds duration. If the duration is shorter, sensitivity appears lower. Although there are no data for Dall's porpoise, in experiments on bottlenose dolphin conducted by Johnson (1967), a change of auditory threshold with changes in pulse duration has been shown (Fig. 1). In perception of pure tone stimulus the porpoise integrates the acoustic energy in the same manner as humans.

If we assume I as the threshold intensity for a pure tone stimulus of duration t , I^∞ as the strength of threshold for a very long duration, and τ is a time constant, the following relative formula is formed--

$$I/I^\infty = 1 + \frac{\tau}{t} \quad (1)$$

The time constant (τ) for humans and a bottlenosed dolphin are shown in Fig. 2.

The time constant for the dolphin is 0.15 seconds at 9 kHz, thus at duration of 0.1 seconds, using Expression (1), the auditory threshold increases by 4 dB from the level at infinite duration. At 145 kHz no data are available to estimate threshold increments and data for 100 kHz were substituted. Because the time constant (τ) at 100 kHz is not known, the increments were estimated from Fig. 1 using differences in auditory threshold values between infinite duration and durations of 100 μ s and 50 ms. The increments between them were 24 dB and 7 dB, respectively.

The threshold value for humans decreases when sound repeating several pulses or more per second is heard because of the auditory function which integrates energy of sounds. The same should occur for Dall's porpoise and because the dolphin mode sound generator emits pulses with an average interval of 18 ms, the declining value for these pulses for Dall's porpoise was estimated as 11 dB based on data for humans.

3. Effect of ambient noise

When porpoise listen to a sound in water where broadband ambient noise exists, only a relatively narrow band (critical band width) near the frequency of the sound has a masking effect. The critical band width (C.B.W.) can be obtained by measuring auditory threshold values for

pure tones in the continuous broadband noise. Using the following expression, C.B.W. can be calculated.

Intensity per hertz of the noise x C.B.W. = absolute intensity of a
tone at its masked
threshold

However, correction of the receiving directivity index is necessary at sea. Since there are no data on Dall's porpoise, the critical band width for bottlenose dolphins (C.B.W. at 9 kHz is 28 dB) as measured by Johnson (1968) was used. Although no measurements were made at frequencies greater than 100 kHz, the C.B.W. at 100 kHz was used for that at 145 kHz because the curve around 100 kHz shows little slope.

For noise itself, based on Knudsen's average noise spectrum in deep seas (N.J.) with a parameter of wind velocity, N.J.s at 9 kHz are: -64 dB (re 1 microbar/Hz) at sea state 1, -54 dB at sea state 3, and -47 dB at sea state 6. N.J.s around 145 kHz are -70 dB both at sea states 1 and 3 because Mellen's thermal noise becomes dominant, and -68 dB at sea state 6.

Noise level (N.L.) which is actually felt by porpoises is expressed as follows--

$$N.L. = N.J. + B.W. - DI \quad (2)$$

Where N.J. is ambient noise spectrum, B.W. is critical band width, and DI is the receiving directivity index, and all are expressed in dB units.

Based on the ambient noise^A spectrum and estimated values of the effective masking noise levels, reported by Au et al. (1974), DI values were calculated to be 17 dB at 50 kHz and 23 dB at 145 kHz. Then, DI value at 9 kHz was assumed to be 3 dB. N.L. values at 145 kHz calculated were less than auditory threshold values of Dall's

porpoise (-45 dB) even at sea state 6. Therefore, we do not have to take into account the N.L. value but only the duration of pulse when we consider the effective range of the 145 kHz pulses for Dall's porpoise.

4. Effective range

The values of 4.0 dB/km at 10 kHz and 37 dB/km at 145 kHz were used as the sound absorption coefficients for horizontal propagation of the sounds. The values of -36 dB at 10 kHz and -45 dB at 145 kHz which were used as auditory threshold values of Dall's porpoise were estimated by Awbrey et al. (1979) based on dissection studies.

Effective range values (Table 1) were obtained at the point of interception of the two curves, i.e. the curve which shows sound pressure decreasing with distance and the curve of auditory threshold values corrected by pulse duration and masking noise as in Figs. 4 and 5. In Table 1, effective range values with a 10 dB margin are also shown in brackets.

Since we have no data on the relationship between masking noise and auditory threshold for specific pulse sounds, effective ranges were obtained by assuming sea state and duration of pulse were independent factors. Effective range values obtained for both factors were compared and the smaller value was considered to be the actual effective range.

Where a 10 dB margin was given, the effective range decreased to 40 to 50% of the original effective range at 9 kHz. At 145 kHz, the decline was less, to about 87% because sound absorption is great and the curve of sound strength declining with distance shows a steep slope around 1 km distance at 145 kHz.

It has been reported (Norris et al. 1966) that directionality of super sonic beams emitted by a species of porpoise is 4° at 200 kHz, 10° at 150 kHz, 24° at 100 kHz, and 34° at 50 kHz. Directionality also occurs in receiving. Therefore, from the viewpoint of having a wide angled emission and wide angled receivability, a sound generator with low frequency beams has an advantage.

With regard to the influence of sea state, as the sea state becomes 1 to 3 and 3 to 6, the noise increases and the effective range decreases to half for each case at 9 kHz. However, at 145 kHz, because the DI value is large and noise spectrum level is low, noise does not affect the auditory threshold of porpoise or the effective range.

Comparing values of the effective range obtained by the two methods, i.e., the value based on pulse duration and the value based on noise at sea state 3 without margin, the smaller one was used as the value of actual effective range. The values are 1,480 m for the low frequency sound generator and, for the high frequency sound generators, 1,480 m for the dolphin mode and 1,600 m for the simple mode. The effective range for one sound generator is twice the above values. Thus, the ranges are 3.0 km for the low frequency sound generator, 3.0 km for the dolphin mode machine, and 3.2 km for the simple mode machine. Therefore, 5 generators are necessary for 330 tons of gillnets to have certain effects.

5. Summary

The effective ranges of sound generators were estimated from values at points of intersection of two curves, i.e., the curve of sound pressure decline with distance and the curve of auditory threshold values.

In this study, estimated auditory threshold values for Dall's porpoise were used as well as changes in auditory threshold values for bottlenosed dolphins when they hear short pulse sounds and when ambient noise is present.

Because there are several factors which produce noise at sea, such as rain and strong wind, etc., a greater value of margin is desirable. However, in this report, the actual effective range was obtained by considering the margin as 0 dB, using the lower value of calculated effective ranges based on threshold data by duration of pulses, and noise data at sea state 3. The estimated actual effective ranges ranged from ^{3.0}~~2.5~~ to ^{3.2}~~3.0~~ km, and thus, 5 generators are estimated to be necessary for 330 tans of gillnets.

Further study should be conducted in the future using data obtained from Dall's porpoise only.

REFERENCES, TABLE 1, AND FIGS. 1 TO 5 ARE IN THE JAPANESE DOCUMENT