

相模湾における鉛直方向音波伝搬試験について

網谷泰孝^{*1}, 安藤久司^{*2}, 中西俊之^{*1}

土屋利雄^{*1}, 山本浩文^{*1}, 岩柳順二^{*1}

長距離伝搬の水中音響機器の性能を考えるうえで、吸収損失は非常に重要な要素である。そこで、水中画像伝送システムを設計するために、相模湾において鉛直方向音波伝搬試験を行い、吸収損失を測定した。その結果、8~14kHzではThorpの式を、30~50ではFrancois & Garrisonの式を使用するのが適当という結論を得た。

Measurement of Vertical Pass Sound Absorption in the Sagami Bay

Yasutaka Amitani^{*3}, Hisashi Ando^{*4}

Toshiyuki Nakanishi^{*3}, Toshio Tsuchiya^{*3}

Hirofumi Yamamoto^{*3}, Junji Iwayanagi^{*3}

Sound absorption in sea water is an important factor in designing long range underwater acoustic equipment. We measured vertical pass sound absorption in Sagami Bay and found that the equation of Thorp is applicable at 8-14 kHz and the equation of Francois & Garrison is applicable at 30-50 kHz.

1. はじめに

現在、海洋科学技術センターでは、潜水船のTVカメラで捕えたTV画像を音響信号を用いて母船へ伝送するシステムの開発を進めている。これは、潜水船は研究者が直接肉眼で海底を観察でき

るという大きな特徴をもっている反面、1潜航1人の研究者しか搭乗できないという調査効率の悪さを補おうというものである。

本システムでは大量の情報を高速で伝送するため、使用周波数をできるだけ高くすべきであるが、

*1 海洋科学技術センター深海開発技術部

*2 運輸省(元、海洋科学技術センター深海開発技術部)

*3 Deep Sea Technology Department, Japan Marine Science and Technology Center

*4 Ministry of Transport (Former Japan Marine Science and Technology Center)

一般に高周波ほど海中伝搬における吸収損失が大きくなるため、吸収損失、伝送距離、システム規模（潜水船に搭載するために、寸法・重量等に制限がある）等を考慮して最適な周波数を選択する必要がある。ところが、吸収損失に関するデータは少なく、実験室レベルの実験式や水平方向伝搬の実測例だけで、本システムの設計に必要な鉛直方向伝搬の実測例はほとんどない。また、実験室レベルの実験式では、吸収損失は圧力に依存するという報告もされており、実際に測定する必要性に迫られた。そこで、相模湾において2000メートル潜水調査船システム「しんかい2000」（以後潜水船と記す）および「なつしま」（以後母船と記す）を用いて、鉛直方向音波伝搬試験を行った。

2. 試験

2.1 試験日および海域

- (1) 試験日：昭和60年6月15日
- (2) 試験海域：相模湾（35°01'N, 139°22'E）
水深1400m

2.2 試験方法

試験は潜水船に送信装置を、母船に受信装置を

搭載して、潜水船が海面海底間を下降上昇する間にパルス波の送受信を行い、受信信号をデータレコーダに録音した。そして、テープを再生し、レベルレコーダで受信レベルを読みとった。図1に測定系を示す。

(1) 使用測定器

送波器1：OCEANO INSTRUMENT 社製
PET 191 E

送波器2：OCEANO INSTRUMENT 社製
PET 292 E

受波器：ITHACO 社製 601-1

（送波器及び受波器の指向性を図2に示す）

電力増幅器：ビクター JM-S500 MF

パルス発生器：HP 社製 3314 A

増幅器：ITHACO 社製 451

バンドパスフィルタ：WAVETEK 社製753 A

データレコーダ：TEAC XR 310

レベルレコーダ：B & K 社製 2307

(2) 送信パルス

パルス幅：20msec

周波数：8, 10, 12, 14, 17, 20kHz

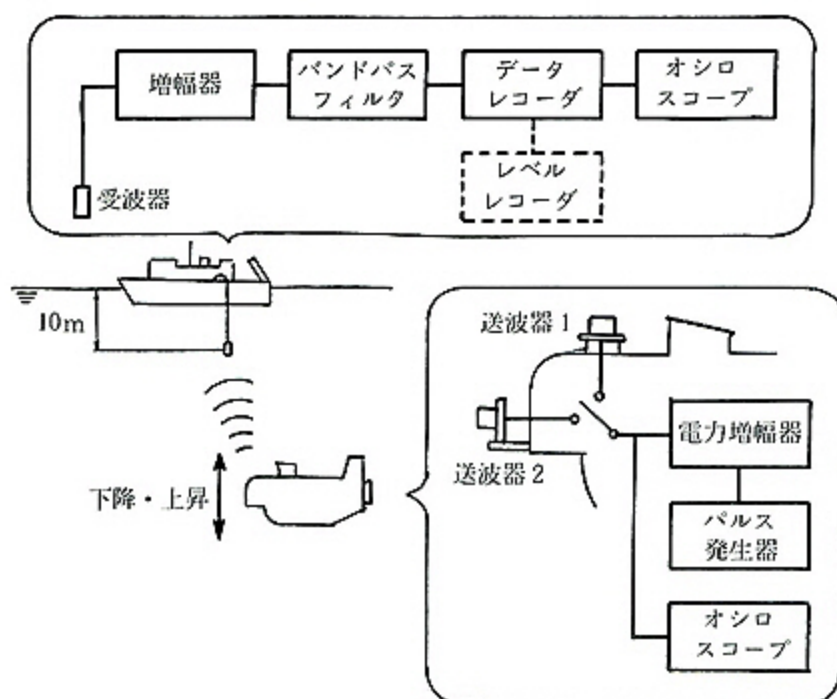


図1 測定系
Measurement System

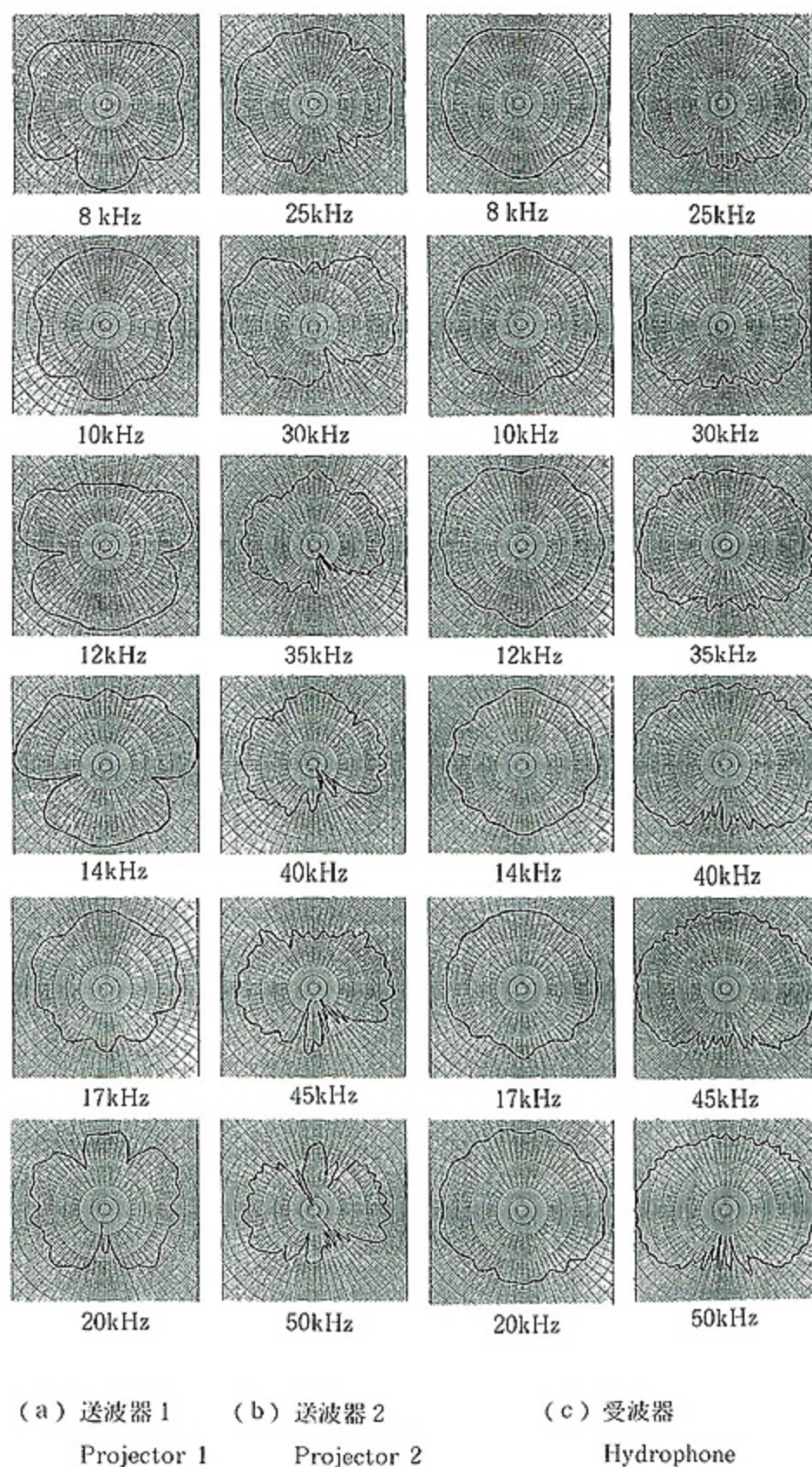


図2 送受波器の指向性
 Patterns of the transducers

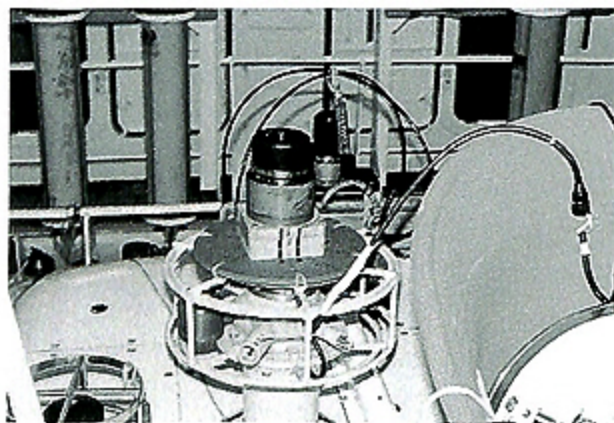


図3 送波器1
Projector 1

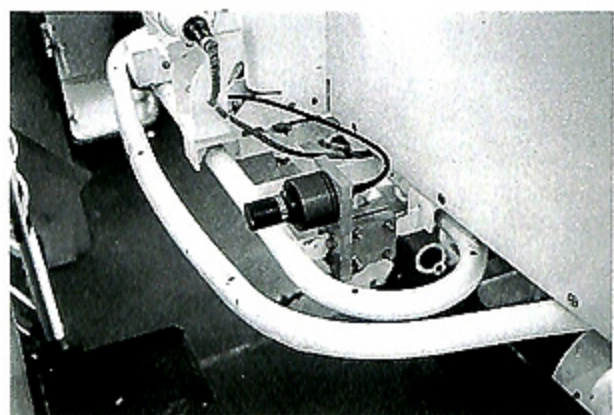


図4 送波器2
Projector 2

(PET 191 Eを使用)
25, 30, 35, 40, 45, 50kHz
(PET 292 Eを使用)

繰り返し：1周波につき1秒間隔で60パルス

(3) 送波器と受波器の位置関係

送波器と受波器の位置関係は、測定中できる限り鉛直線上に並ぶようにしたが、データ分析にあたって、送波器および受波器の指向性を補正するために、音響航法装置を用いて母船と潜水船の相対位置の測定を行った。

2.3 試験結果

(1) 鉛直方向伝搬の吸収損失

海水中における音波の伝搬損失の主要因としては、拡散と吸収があげられ、球面拡散と仮定すると次式で表わされる。

$$I = I_0 - 20 \log R/R_0 - \alpha (R - R_0)$$

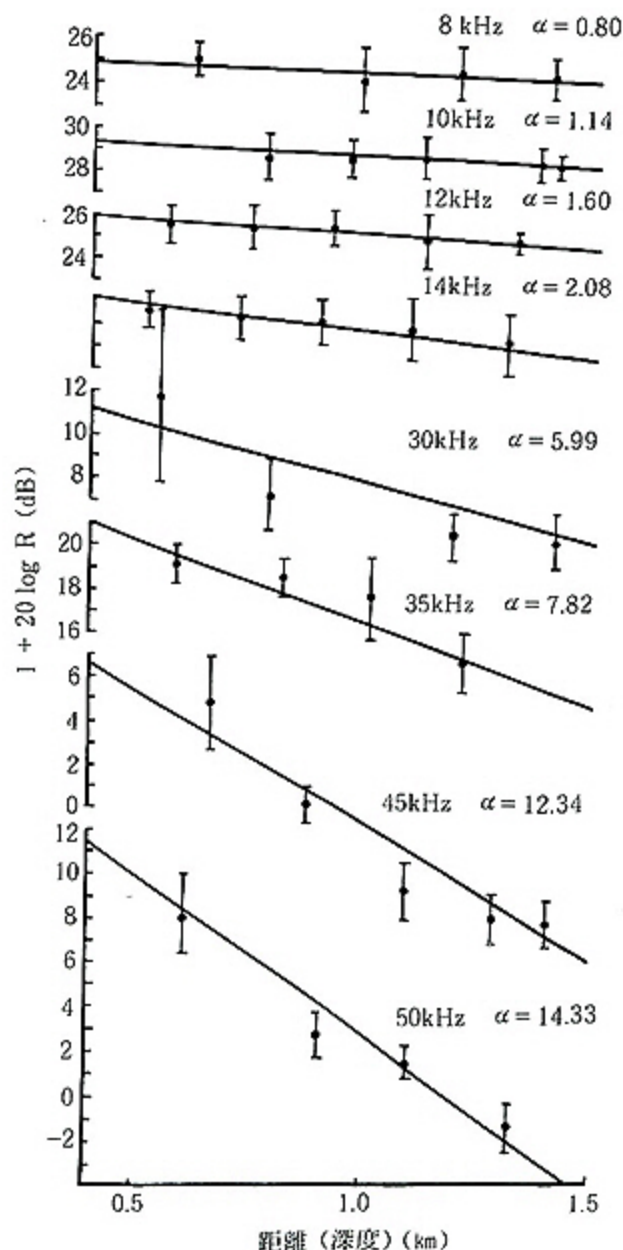


図5 吸収損失特性
Absorption Data

ただし、 I_0 , I は音源から R_0 , R の距離での音の強さ、 α は吸収係数である。そして右辺第二項は球面拡散による損失を、第三項は吸収損失を表わしている。

そこで、横軸に送・受波器間の距離（測定中、送・受波器は鉛直線上から数度しかずれなかったため、深度と考えてよい）を、縦軸に受信レベルに拡散損失 $20 \log R/R_0$ を加えたものをプロットした。

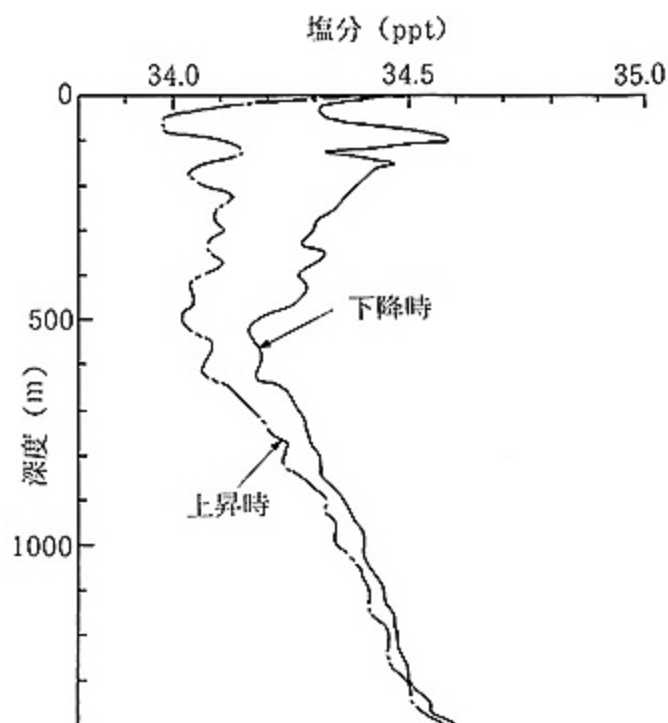


図6 塩分プロファイル
Salinity Profile

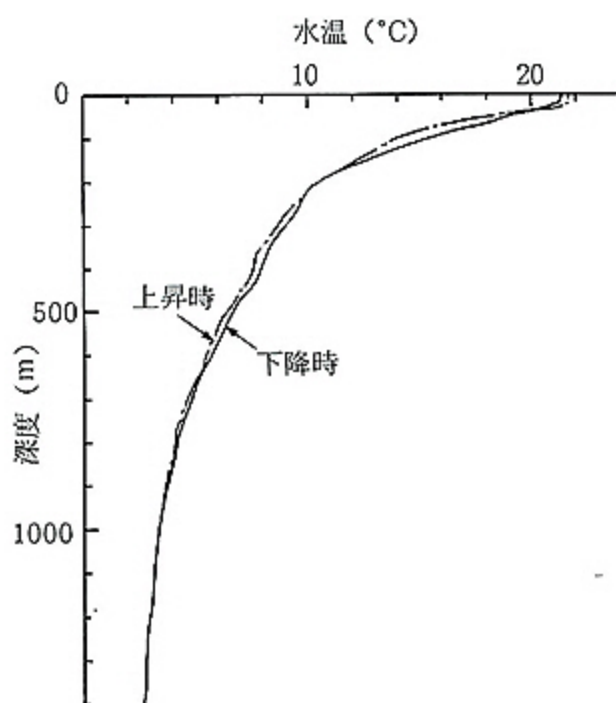


図7 水温プロファイル
Temperature Profile

ただし、受信レベルは音源レベルおよび送・受波器の指向性補正を施した。その結果を図5に示す。図中黒丸は平均値であり縦線は標準偏差である。また、各プロットを結ぶ直線は回帰直線であり、この傾きが $-\alpha$ である。尚、この結果を得るにあたって、送・受波器間の距離が1周波の測定中に約20m変化したことが、これは無視した。また、著しくはずれる値は除去した。17, 20, 25, 40kHzはS/N不足で分析できなかった。

(2) 水温および塩分

水温および塩分を潜水船装備のSTDで測定した。その結果を図6および図7に示す。

(3) 試験結果の検討

現在、水中音響機器の設計で一般に用いられている吸収損失の式としては、Schulkin & Marshの式、Thorpの式がある。また、最近Francois & Garrisonの式が発表されている。そこで、これらの式と今回の試験結果を比較してみた。

(1) Schulkin & Marshの式⁽¹⁾ (S & Mの式)

$$\alpha = \left(A \frac{S f_T f^2}{f_T^2 + f^2} + B \frac{f^2}{f_T} \right) \times \frac{100}{91.4} \quad (\text{dB / km})$$

f: 周波数 (kHz), S: 塩分 (ppt)

$$A = 1.86 \times 10^{-2}, B = 2.68 \times 10^{-2}$$

$$f_T = 21.9 \times 10^{6 - 1520 / (T + 273)}, T: \text{温度} (^\circ\text{C})$$

(2) Thorpの式⁽¹⁾

$$\alpha = \left(\frac{0.1 f^2}{1 + f^2} + \frac{40 f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 \right) \times \frac{100}{91.4} \quad (\text{dB / km})$$

f: 周波数 (kHz), 温度は 4°C としている。

(3) Francois & Garrisonの式⁽²⁾ (F & Gの式)

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (\text{dB / km})$$

f: 周波数 (kHz)

$$A_1 = 8.86 / C \times 10^{(0.78 \text{pH} - 5)}$$

$$P_1 = 1$$

$$f_1 = 2.8 (S/35)^{0.5} 10^{4 - 1245 / (T + 273)}$$

$$C = 1412 + 3.21 T + 1.19 S + 0.0167 D \quad (\text{音速})$$

pH: ペーハー, S: 塩分 (ppt)

T: 温度 ($^\circ\text{C}$), D: 深度 (m)

$$A_2 = 21.44 S / C (1 + 0.025 T)$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \times 10^{-4} D + 6.2 \times 10^{-9} D^2$$

表1 試験結果と各種実験式から求めた吸収係数の比較

Comparison of Our Measurements with some Equations

周波数 (kHz)	実験結果 (dB/km)	Thorpの式 (dB/km)	S&Mの式 (dB/km)	F&Gの式(dB/km)	
				pH 7.5	pH 8.0
8	0.80	0.80	0.59	0.60	0.66
10	1.14	1.18	0.92	0.90	0.96
12	1.60	1.64	1.31	1.26	1.32
14	2.08	2.16	1.77	1.68	1.74
30	5.99	8.26	7.28	6.38	6.44
35	7.82	10.55	9.47	8.12	8.18
45	12.34	15.19	14.13	11.61	11.67
50	14.33	17.44	16.51	13.30	13.37

$$f_2 = \frac{8.17 \times 10^{-8} - 1.990/(T+273)}{1 + 0.0018(S-35)}$$

$$A_3 = 4.937 \times 10^{-4} - 2.59 \times 10^{-5}T + 9.11 \times 10^{-7}T^2 - 1.50 \times 10^{-8}T^3 \quad (T \leq 20^\circ\text{Cのとき})$$

$$A_3 = 3.964 \times 10^{-4} - 1.146 \times 10^{-5}T + 1.45 \times 10^{-7}T^2 - 6.5 \times 10^{-10}T^3 \quad (T > 20^\circ\text{Cのとき})$$

$$P_3 = 1 - 3.83 \times 10^{-5}D + 4.9 \times 10^{-10}D^2$$

これらの式からわかるように、本来 α は温度、塩分、深度(圧力)、pHなどに依存しているとされており、鉛直方向の音波伝搬試験を行い、その結果から α = 一定として α を求めるのは厳密ではない。しかしながら、今回の試験結果は測定値のばらつきが大きく、厳密な検討ができないため、各式に必要なパラメータの値を代入し、25mごとに α を求めて平均し、これと前述の回帰直線から求めた α と比較することにした。ただし、pHは測定していないため、F & GのpH 7.5およびpH 8で計算した。その結果を表1に示す。

この表から、8、10、12、14kHzではThorpの式が良く合っており、30、35、45、50kHzではF

& Gの式が良く合っていることがわかる。これらの式で考慮しているパラメータは異っているため、このまま比較することは好ましくないが、パラメータの値の海域による差はあまりないと考えれば、水深1400m程度の海域では、15kHz以下はThorpの式、30kHz以上はF & Gの式(ただし諸パラメータは典型的な海域を想定する)を適用すれば良いと思われる。

4. おわりに

今回の試験では、S/N不足のため15～30 kHzの吸収係数を測定できなかったが、水中画像伝送システムにおける使用周波数帯域の本命は、この周波数帯域であるので、今後さらに試験を実施していく予定である。

また、前述した式の適・不適については、あくまでも水深が1400m程度の場合であって、さらに深くなった場合はこの限りではない。したがってさらに深い海域での試験も実施する予定である。

尚、今回の試験は潜水船を用いて、下降上昇しながら実施したため、十分モニタできなかった。今後はアーマードケーブルで送信装置を海中に吊り降すといった方式を用いて、ばらつきの小さい良質のデータを取得することを考えるべきであろう。

参考文献

- 1) Robert. J. Urlick, "Principles of Underwater Sound for Engineers," McGraw-Hill, 1975, 96—104
- 2) R. E. Francois and G. R. Garrison, "Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption" J. A. S. A. 72(6), 1982, 1879—1890

(原稿受理: 1986年6月9日)