HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	海中不連続からの超音波反射について：第1報 海中小反射物群からの超音波反射の近似的取扱いについて
Author(s)	石田, 正巳; 佐野, 典達
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 12(4), 279-292
Issue Date	1962-02
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/23145
Type	bulletin (article)
File Information	12(4)_P279-292.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

海中不連続からの超音波反射について

第1報　海中小反射物群からの超音波反射の近似的取扱いについて

石田正巳・佐野典達
(北海道大学水産学部測器学教室)

On Reflection of Ultrasound from Discontinuous Boundaries in the Sea

I. Approximate treatment of ultrasound from the group of small reflecting bodies in the sea

Masami ISHIDA and Noritatsu SANO
Faculty of Fisheries, Hokkaido University

Abstract

Echoes of ultrasound have been recorded from acoustically discontinuous boundaries due to the group of small reflecting bodies (plankton, air bubbles, mud grains, etc), large boundary surfaces between two media with different acoustical impedances (sea water—sea bottom, temperature or salinity changes of two water masses, etc), and various finite marine lives.

In this paper (I) approximate equations for treatment of ultrasound reflection from the group of small reflecting bodies in the sea are described.

In the first step "target strength" or "reflection loss" of a small reflecting body is calculated and graphed assuming that the reflecting body is spherical and only longitudinal vibration may be excited in the reflecting body.

Next "reflection loss" of the group of such small reflecting bodies is calculated assuming that the resultant reflected sound pressure at the receiving point may be the vectorial sum of individual sound pressures reflected from individual bodies only once.

The measurements of "reflection loss" of the group of plankton, air bubbles are carried out in the experimental water tank, and the measured values are compared to the above calculated values with a considerable agreement.

1 緒　　言

海中には，超音波の反射を生ずる不連続的境界が色々あるが，これらを反射の機構から便宜的に次のグループに分けて考察すれば好都合である。即ち

(1) 小反射物群からの反射

これは，プランクトン群，気泡群，海雪（マリン・スノー）群，其他の微小な懸垂物群で，散乱的反射を生ずる場合である。

(2) 特性音響インピーダンスの不連続に依る境界面の大きい場合の反射

これは海底，海面の反射，及び海水の温度差，塩分差等に基く異った水塊の境界面の反射のように，特性音響インピーダンスの不連続に原因する反射である。

(3) 有限大いさで任意形状の反射体からの反射

これは種々の海中動植物，其他の種々の標的からの反射で上記の (1) と (2) の中間領域の反射である。

本論文第1報では (1) の小反射物群からの散乱的反射を近似的にでも定量的に取扱う理論について述べ，その近似的理論式を用いて，海中で遭遇する機会の多いプランクトン群，気泡群，泥粒群，等について，反射物の反射強度を示す **target strength** (標的の強さ) 又は **reflection loss** (反射損失) を計算し，且これを **acoustical radius ka** に対して図示した。次いで，実験水槽内に於いて，プランクトン群，気泡群に対して，群構成数の変化に対する反射損失の変化を，使用周波数をパラメーターとして実測した。それらの実測結果を近似的理論値と比較して，反射体によっては近似的に使用できる可能性を示した。

2 海中小反射物群からの超音波反射量の近似的理論式

小反射物体からの散乱音場については，古くから **Lord Rayleigh**[1] が微小不動剛球，及び周囲の媒質と少しく密度，圧縮率，等の音響定数の異なる小反射物体について求めてあり，**H. Stenzel**[2] は，不動剛球の場合について更に **acoustical radius ka** の大きい領域 (ka<40) にまで拡張して求めている。又 **C. Anderson**[3] は横振動の影響を考慮しなくともよい流体球について，平面波音場に対する散乱音場を求めている。実際に海中で遭遇する微小反射体としては，気泡とか，又ある種のプランクトンのように，近似的に流体球と考えて励振される縦振動のみの影響を考えてよい場合と，ある

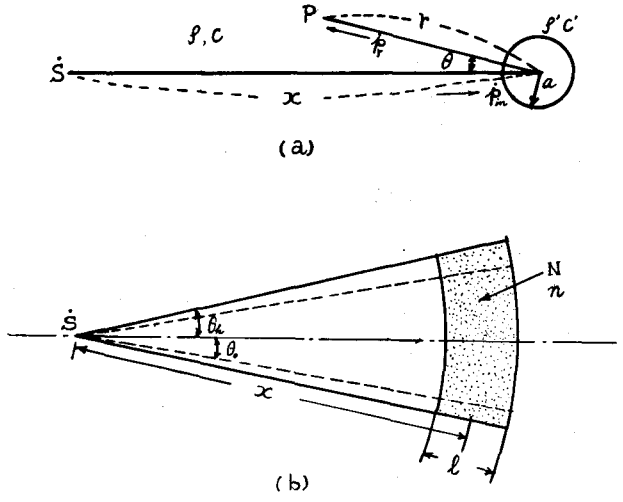


Fig. 1. Reflection of ultrasound from the group of small reflecting bodies in the sea

(a) Reflection of ultrasound from a single spherical reflecting body

(b) Reflection of ultrasound from the group of small reflecting bodies

種のプランクトンのように固い厚い甲殻を有するものとか，砂粒，泥粒等のように励振される縦振動と横振動の両者の影響を考えねばならぬ場合とある。今茲では，数式を簡単化するために，近似的に反射体が微小球体であって，且，縦振動のみ励振されるものと考えた散乱的反射の場合について，取扱うことにする。又その反射量を定量化して表示するためには，SONAR 技術に用いられる target strength，即ち反射体に入射する入射音場の強さに対する反射体から特定方向に（普通は $\theta=0°$ 即ち backward に）単位距離（普通は 1 meter）に生ずる散乱音場の強さの比のデシベル数を用いるがこれは橋本[8]の用いた反射損失 β_1 と数値的には同一のものである。このような定義量を用いて，反射体の反射能力を比較する尺度とし，任意の音響定数を有する微小球状反射体の target strength 又は反射損失を一般の球面波音場の場合について求めるものとする。今第1図(a)に於いて，音源の強さ $\dot{S}$ なる球面波音源を考え，音源より距離 x なる位置に半径 a なる微小球状反射体があり，その中心から入射方向との角度 θ なる方向で，十分遠い距離 r なる点 P における反射音圧 $\dot{p}_r$ は，平面波が入射した場合の Anderson の結果がそのまま使用出来るものと仮定すると

$$\dot{p}_r=|\dot{p}_{in}|\left(\frac{1}{kr}\right)\exp(ikct-ikr)\times\sum_{m=0}^{\infty}P_m(\mu)(-1)^m(2m+1)/(1+i\,C_m)\quad\cdots\cdots(1)$$

の形に書くことが出来る。但し $|\dot{p}_{in}|$ は入射音圧 $\dot{p}_{in}$ の振幅であって，今は球面波を考えているから，次式で与えられる筈である。

$$\dot{p}_{in}=i\,\rho\,\omega\,(\dot{S}/4\pi x)\exp(ikct-ikx)\quad\cdots\cdots(2)$$

又 $P_m(\mu)$ は $\mu=\cos\theta$ に関するルジャンドル函数であり，目下の backward の方向 $\theta=0°$ に対しては 1 である。又 (1) 式中の C_m は次の式を表わすものである。

$$C_m=\frac{[\alpha_m(k'a)/\alpha_m(ka)]\,[n_m(ka)/j_m(k'a)]-[\beta_m(ka)/\alpha_m(ka)]\,gh}{[\alpha_m(k'a)/\alpha_m(ka)]\,[j_m(ka)/j_m(k'a)]-gh}$$

この式中の記号は次の意味を有する。

$\alpha_m(ka)=(2m+1)\,\partial[j_m(ka)]/\partial(ka)=m\;j_{m-1}(ka)-(m+1)\,j_{m+1}(ka)$

$\beta_m(ka)=(2m+1)\,\partial[n_m(ka)]/\partial(ka)=m\;n_{m-1}(ka)-(m+1)\,n_{m+1}(ka)$

j_m ： 球状ベッセル函数。

n_m ： 球状ノイマン函数。

g ： $g=\rho'/\rho$　相対密度。

h ： $h=c'/c$　相対音速。

ρ, ρ' 及び c, c' は夫々媒質，反射体の密度と音速である。

k, k' は媒質，反射体内の位相定数である。

目下の微小球体である条件 $ka\to 0$ 及び $x>\lambda$, $r>\lambda$ という条件を用い，j_m と n_m に対する級数中第一項のみを近似的にとって考えると，(1) 式より次の反射量表示が得られる。

$$|\dot{\gamma}_r|=\left|\frac{\dot{p}_r}{\dot{p}_{in}}\right|=\frac{a}{2r}\cdot 2(ka)^2|(1-gh^2)/(3gh^2)+(1-g)/(1+2g)|\quad\cdots\cdots(3)$$

特に $r=1$ meter とすれば

$$|\dot{\gamma}_1|=\frac{a}{2\times 10^2}\cdot 2(ka)^2|(1-gh^2)/(3gh^2)+(1-g)/(1+2g)|\quad\cdots\cdots(4)$$

となる。橋本[8]の用いた反射損失は

$$\beta_1=20\log_{10}\frac{1}{|\dot{\gamma}_1|}\qquad(\text{db})$$

であり，traget strength は

$$T_s = 10\log_{10}\frac{|\dot{p}_r|^2}{|\dot{p}_{in}|^2} = 10\log_{10}|\dot{\gamma}_1|^2 \qquad \text{(db)}$$

である。

今 (4) 式をもって，微小球状反射体の反射量を近似的に示す近似理論式として，とり上げてみた。(4) 式の意味する所は，いわゆる **Rayleigh** の散乱法則に相当して，反射率（入射音圧 $\dot{p}_{in}$ に対する反射音圧 $\dot{p}_{r=1}$ の比）は反射体の容積に比例し波長の二乗に反比例し，反射体の周囲媒質に対する相対密度 g 及び相対音速 h に関係することが分る。又 (4) 式の適用出来る領域の上限は (4) 式中の $2(ka)^2|(1-gh^2)/(3gh^2)+(1-g)/(1+2g)|<1$ できまる ka の値であって具体的には，反射体の g と h の大いさに対して決定してくることになるのである。第2図には海中で遭遇する機会の多い諸物質，

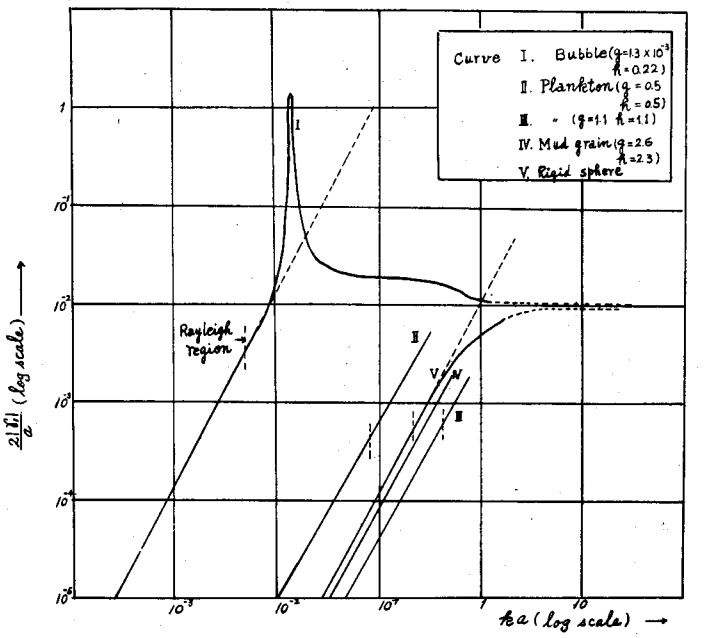


Fig. 2. Diagrams of reflecting quantity $2|\dot{\gamma}_1|/a$ versus acoustical radius ka for the various reflecting bodies

即ち気泡，プランクトン，及び泥粒等に対して (4) 式によって反射量 $2|\dot{\gamma}_1|/a$ を図示したものである。又いわゆる **Rayleigh** の散乱法則の成立すると考えられる領域を点線で附記した。これ以上の領域は，いわゆる共振領域であって，(1) 式の級数の項数を増加して考えねばならぬから解は複雑になる。気泡では第一項が大きいから近似的に第一項のみをとって共振附近の ka に対しても求めてある。周知のように，気泡の共振は第一共振は $ka=0.014$ の時起り，気泡が零次の半径方向の振動姿体を行うものと仮定して $|\dot{\gamma}_1| = \frac{1}{2\times10^2}\cdot\frac{\lambda}{\pi}$ [4] という極大値が得られる。

一般には，(4) 式の示す通り，振動性物質においては，体積弾性率の変化に基く容積変化による擾乱音場と，密度差に基く変位による擾乱音場とは，g および h の組合せによっては，音場は相殺され合うことを示しており，第 3 図には，$|\dot{\gamma}_1|=0$ となる g と h の組合せを計算して図示しておいた。

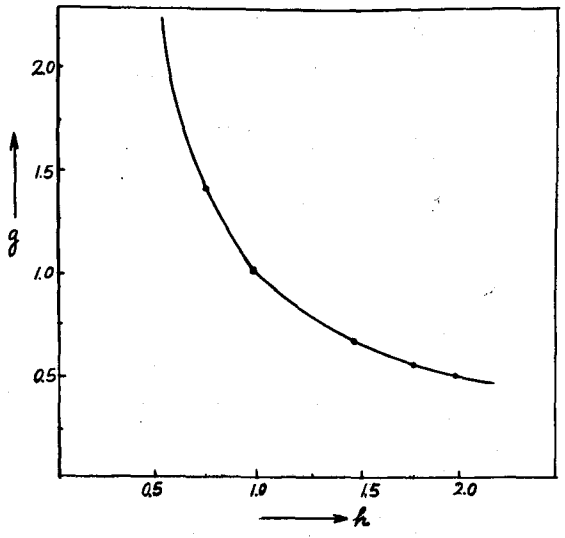


Fig. 3. The g-h curve for $|\dot{\gamma}_1|=0$

即ち

$$g=\frac{(1+h^2)\pm\sqrt{(1+h)^2+5h^2}}{5h^2} \quad \cdots\cdots(5)$$

の関係を満足する g と h の組合せは反射の弱いことを示している。

以上は小反射体が単体としての反射能力を表わす量を近似理論として取扱った。次にこのような微小球状反射体が群をなしている場合については，前に実吉[7]，橋本[10] が魚群の反射を取扱った時の表示を用いて，同様に考えることにする。即ち送受波器の有効指向角を θ_0，群と音源の距離を x，群が有効指向角内で十分広い立体分布をしているものとして，反射に寄与する球殻内の反射体の総数 N は，第 1 図 (b) に於いて

$$N=\pi(x\tan\theta_0)^2\ l\,n\simeq\pi x^2\theta_0^2\,l\,n \quad \cdots\cdots(6)$$

である。ここに

n： 単位容積中の数

l： パルス幅の $\frac{1}{2}$ を媒質内の長さに換算したもの

従って群からの反射量は，個々の反射音圧のベクトル和になるから

$$|\dot{\gamma}_N|=|\dot{\gamma}_r|\times\sqrt{N} \quad \cdots\cdots(7)$$

故に群からの反射損失は

$$\begin{aligned}\beta_N&=\beta_1+20\log_{10}\frac{x}{10^2}+20\log_{10}\frac{1}{\sqrt{N}}\\&=\beta_1+20\log_{10}\frac{x}{10^2}+20\log_{10}\frac{1}{x\theta_0\sqrt{\pi\,l\,n}}\end{aligned} \quad \cdots\cdots(8)$$

として求められることになる。但し (7), (8) 式を求めるに当って，群の個体からの反射音圧は各々からは，只一回づつ反射したものが合成されるものとみなしていることは，注意すべき重大な点であって，多重散乱性の反射体が分布密度大きく存在する時は，特に適用について考慮を要することになる。尚第 3 図に附記した g と h の値は，気泡に対しては標準状態の空気の値，泥粒に対しては，一

般粘土の定数を，プランクトンに対しては，一部は実測値を，他は推定値を使用している。又参考のために，不動剛球，即ち $g=\infty$, $h=\infty$ の場合も附記しておいた。以上の如く，海中小反射体の単体及び群体の反射損失の近似理論式を一般的に示した。

3 水槽実験に就いて

3-1) 実験装置と方法

実験水槽としては，断面 50 cm×50 cm の長さ 13 meter の木製水槽を製作し，第 4 図の如く水

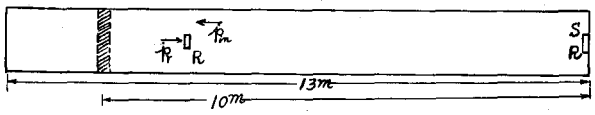


Fig. 4. Experimental water tank used in measuring the reflection loss of plankton and air bubbles

槽の一端に送波器 (S) と受波器 (R) を設置し，送波器から 10 meter の位置に被測定物を分布させて，反射損失を測定するのであるが，分布方法については，後述のように，被測定物の種類に応じて，後述するように工夫した。反射損失の測定法としては，橋本の置換法[8)9)] を用いた。これは迅速な測定に適しているからであるが，標準反射体としては 10 cm 径のガラス玉を用い，これを被測定物の位置に置いて同一測定装置 (第 5 図) の同一働作条件で測定したマージンと被測定物のマージン

Fig. 5. Measuring apparatus used in measuring reflection loss

とを比較して，求める被測定物の反射損失を知る方法である。当研究室にあった 10 cm 径のガラス玉を較正のため，sliding method[11)] で別に反射損失を測定した所，31 db を得たが，10 cm 径のガラス玉の理論的反射損失 $\beta_1=32$ db と殆ど差がないので標準として使用した。用いた周波数は 50 kc と 200 kc であるが，50 kc は NA 型磁歪送受波器で，共に 6 cm×3.8 cm の幅射面を有する。200 kc はチタン酸バリウム電歪送受波器で共に径 7.6 cm の円形幅射面を有する。尚 50 kc 及 200 kc 送波器のパルス幅は，第 6 図及び第 7 図のブラウン管上の測定によって夫々 1.12 meter 及 2.25 meter 程度であった。

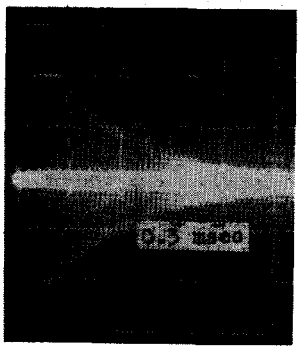


Fig. 6. Pulse width of 50 kc ultrasound

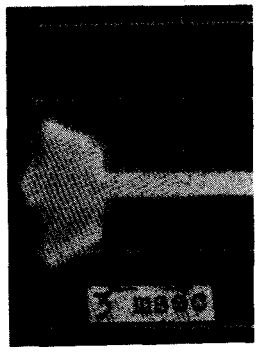


Fig. 7. Pulse width of 200 kc ultrasound

3-2) プランクトン群の反射損失の測定

A) 測定用プランクトン

水槽実験に用いたプランクトンは Calanus plumchrus (第8図) でうすい甲殻を有する。体長2mmのなるべくそろったものを試料として用いた。このプランクトンの g と h の値であるが，h は，目下の所，実験的に求めるのに困難であるが，g は次の如く実測してみた。体長 2 mm のもの 100 尾

Fig. 8. Plankton (calanus plumchrus 2-3 mm in length) used in measuring the reflection loss

(a) Lateral view (b) Dorsal view (c) Bentral view

を試料として用意し濾紙上で体表面の水分は除去しておく。100 尾一緒にして，0.1 mg まで計量できるスプリングバランスで質量を測定し，又 0.1 cc まで計量出来るメスシリンダーで体積を測定し，一尾の平均の密度として略 1.1 gr/cm³ を得た。従って g としては $g \simeq 1.1$ をとることにした。体積の測定が小数点以下二桁目が不正確であるから，g も小数点以下一桁目は信頼度はうすい。然しこのプランクトンを水に沈下させると自然の状態で沈下していくから $g \simeq 1.1$ という値は，近似的に使用できる値とみてよいだろう。プランクトンの形状は長軸を廻転軸とした廻転楕円体に近く，厳密には球体でないが，上記の体積の実測によって，体長に等しい 2 mm を径とする球体と考えた体積に比べて，実体積はその $\frac{1}{2}$ に近い。h としては，体表面の甲殻と内部の体組織を考慮に入れて $h \simeq 1.1$ と仮定してみた。第 2 図の曲線 III はこの種のプランクトンを想定して，(4) 式によって acoustical radius ka に対して $\frac{2|\dot{\gamma}_1|}{a}$ を画いたもので，今 (4) で 50 kc に於いては，$a = 0.1$ cm, $g \simeq 1.1$, $ka \simeq 0.21$ として $|\dot{\gamma}_1| \simeq 5 \times 10^{-6}$ 程度で，これより β_1 としては $\beta_1 \simeq 106$ db が一応の推定値となる訳である。

B) プランクトン群の反射損失の測定

プランクトン群の構成数 N は，実際の反射損失の測定には，かなり多くを用いねばならぬが，尾数を計数するのは繁雑困難なので，メスシリンダーに入れて群の容積を測り，数の代りに容積をもって代行させた。1 cm³ 内に平均して略 100 尾程度入っているので，近似的には容積と数の関係も分る。測定すべき群は，容積を測って，一度に沈下させるべき量を組分けしておく。プランクトンは体表面が乾燥していると，水中に入れた場合，気泡が附着し易いから，前以って適当に水分で湿らせておく。水槽の幅方向に板を渡しこの上に，容積を測った，一度に沈下させるべき群をならべ，幅方向に分布する様に平均化し，プランクトンの沈下速度と見合って，群を除々に水中に静かに入れていき，丁度水槽断面に群が広がった時を見て，[第 9 図 (b)] 手早くマージンを測定し，置換法によっ

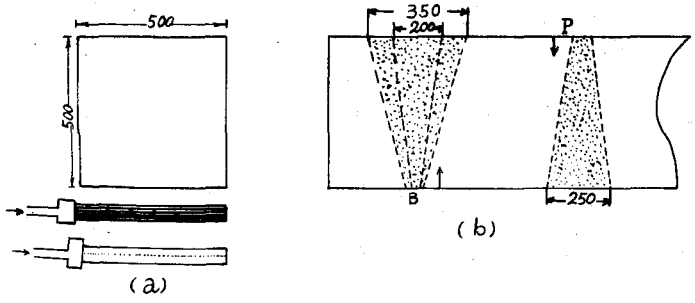


Fig. 9. Experimental water tank equipments
(a) Air bubble generator
(b) Distribution of air bubbles and plankton

て反射損失を求めた。50 kc 及び 200 kc に対して，プランクトンの総数 N を変化して反射損失を測定したものが，第 10 図の点線で結んだ実測値である。第 11 図は，プランクトンの沈下中の分布の状態を水中カメラで撮影したものであり，第 12 図 (a) (b) は夫々 50 kc 及 200 kc に対するマージン測定時の例である。第 10 図に見るように，50 kc の場合は，実測値は比較的よく $\sqrt{N}$ に反比例する傾斜にのるように求められたが，200 kc の場合は，測定値の変動が大きく $\sqrt{N}$ に反比例する

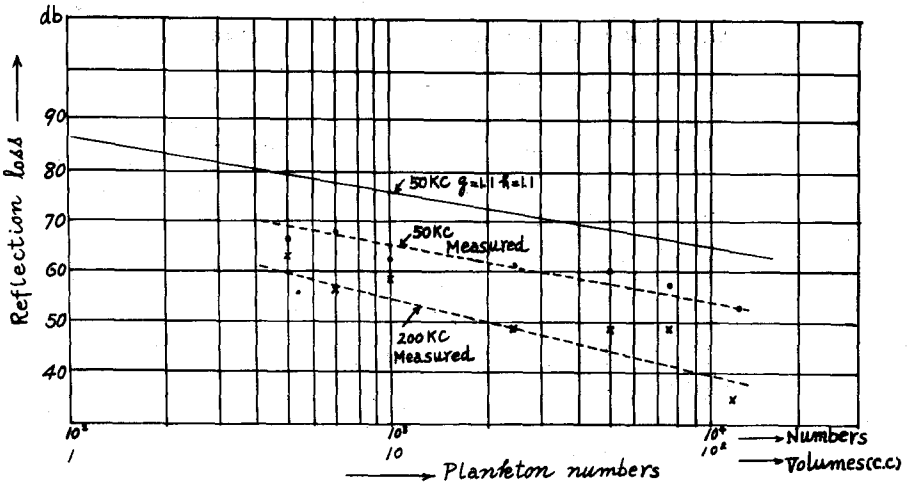
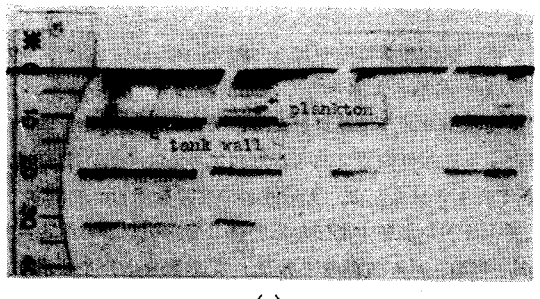
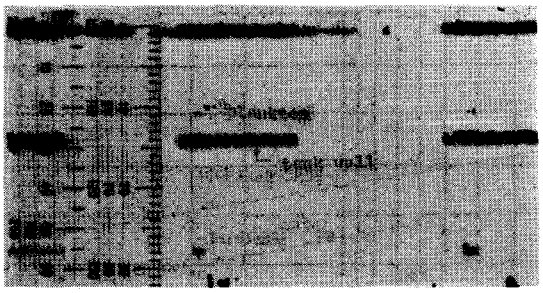


Fig. 10. Diagrams of reflection loss versus numbers of plankton N

Fig. 11. Distribution of plankton in the water tank



(a)



(b)

Fig. 12. Echograms of reflection from plankton
(a) To 50 kc ultrasound (b) To 200 kc ultrasound

傾向は，この実験では，はっきりとは認められなかった。又第 10 図の実線は $h \simeq 1.1$, $g \simeq 1.1$ の場合，50 kc に対する推定値線であるが，このような水槽実験では，(8)式の群からの反射損失値は，第二項の距離による波面拡大による損失は考慮しなくともよいから (8) 式は

$$\beta_N = \beta_1 + 20 \log_{10} \frac{1}{\sqrt{N}} = \beta_1 + 20 \log_{10} \frac{1}{\sqrt{Al'm}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

と見ることが出来よう。但し (9) 式で A は水槽断面積，l' はプランクトン群の分布幅で実験では約 20 cm で，パルス幅より小さい。n は平均分布密度，N はプランクトン総数である。

推定値と実測値の比較については，4 の考察の項で触れる。

3-3) 気泡群の反射損失の測定

A) 気泡群の発生方法

種々の大いさの気泡特に微細な気泡を自由に発生させることは技術的に困難であり，[4)5)] ここでは比較的大きい気泡を発生させて取扱った。気泡を小分布密度で発生させるには半径 3 mm の細いガラス管の先端に 0.2 mm 径の細孔を有する注射針をとりつけ，発生孔が水槽幅方向に略一直線上に等間隔に並ぶように，上記の細管を 7 本一まとめにして配置し，[第 9 図(a)] これらに 2 cm 径のガラス管を共通に接続して，この共通管を通して空気圧縮装置で空気を送りこんだ。[第 9 図(b)装置 I] 又気泡数を大分布密度で発生させるには，1 cm 径の薄い鉄板管に 0.3 mm 径程度の細孔を 1 cm の等間隔に 49 個あけ，同じく空気圧縮装置で空気を送りこんだ。[第 9 図(a)装置 II] 送りこむ空気量を加減して気泡数を調節し，気泡大いさと数は水中カメラで撮影して，発生状態を調べて，それから反射損失を測定するようにした。第13図には，その分布状態を水中カメラで撮影した一例を示す。気泡の大いさは水中に入れたスケールの目盛から求めたが，1～3 mm 径のものが多く，1 mm 径以下のものも少数混入している。気泡数を変えた場合，種々の場合について，その気泡の大いさを調べたが，凡そ 1～3 mm 径のものが殆ど大部分で，2 mm 径のものが一番多いように観察された。気泡数は，水槽断面の数ケ所で水中カメラで写真をとり，分布密度の平均を求め，全体数を推定した。第 13 図はストロボ同調による高速度撮影であるが写真にみるように，気泡は球体と見做してよいであろう。気泡数を更に多く発生させるには，上記後者の装置を 5 cm の間隔で 2 台併用する。気泡は螺旋状を画いて上昇してくるから水槽上部になるに従って，気泡群の厚みは広がって，水槽上部で約 20～35 cm 位であるが，勿論，パルス幅内にある。気泡数を余り多く増加すると気泡が互に附着してきて，分布が乱れてくるから気泡のような多重散乱性のものでは，このような状態は特に避ける

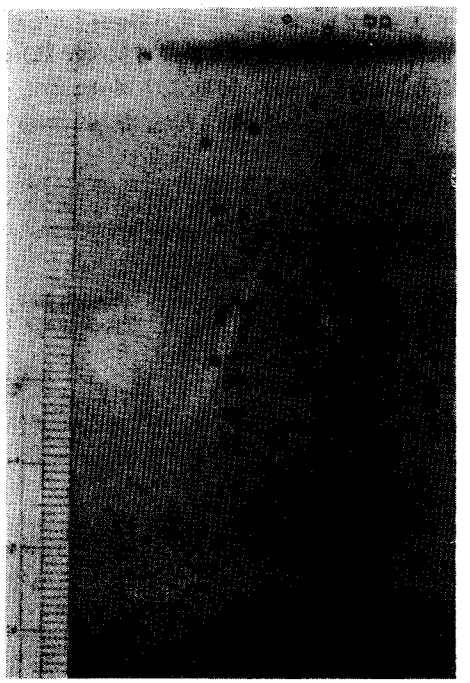


Fig. 13. Distribution of bubbles in the water tank

べきであろう。本実験では気泡数 500 個～900 個間は気泡発生装置 I で，1000 個～4000 個間は発生装置 II で，4000 個以上は発生装置 II を 2 台併用した。

B) 気泡群の反射損失の測定

気泡数 N を変化して，50 kc 及び 200 kc で置換法を用いて気泡群の反射損失を測定し，その結果を整理したものが第 14 図の点線で結んだ実測値群である。気泡の場合は，50 kc 及び 200 kc の両場合共に，気泡数 N の変化に対して，反射損失は $\sqrt{N}$ に反比例する傾斜と，N に反比例する傾斜の中間で，N に反比例する傾斜に近い傾向である。然し気泡は移動しているので，マージン測定

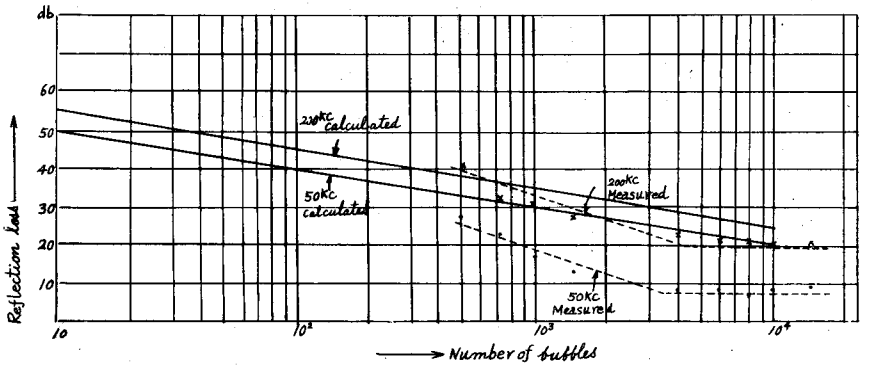


Fig. 14. Diagrams of reflection loss versus numbers of plankton N

中，反射音圧を別にシンクロスコープ上で観察していると振幅はかなり変動しているのが観察される。気泡数 500 個～4000 個（面密度にして平均 0.2～1.6 個/cm² 位）迄は，以上のような傾向であるが，気泡数がそれ以上になると反射損失は，50 kc 及び 200 kc 共に一定化してくる傾向をもつ。又 50 kc の方が 200 kc より反射損失は小さく実測された。第 15 図に，反射損失測定時のマージン

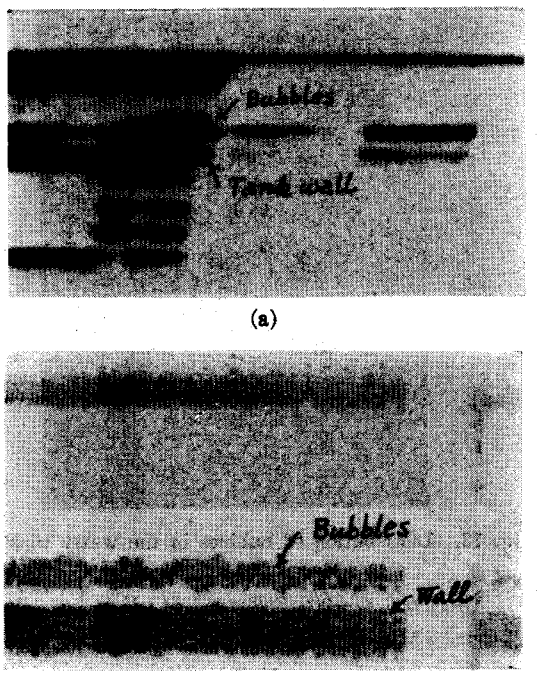


Fig. 15. Echograms of reflection from air bubbles
(a) To 50 kc ultrasound (b) To 200 kc ultrasound

測定の一例を示す。尚，気泡に対しては，$g \simeq 1.3 \times 10^{-3}$，$h \simeq 0.22$ という値ははっきりしているので，半径 1 mm の気泡が一番多く発生されているとみて，これを代表的半径として $a = 0.1$ cm として第 2 図を用いて 50 kc 及び 200 kc の場合の $ka \simeq 0.21$，$ka \simeq 0.84$ の場合の $|\dot{\gamma}_1|$ を求め更に β_1 を求めると，夫々 β_1 として 50 db 及び 65 db 程度と推測される。従って (9) 式に従って，気泡群の反射損失を推測したものが第 14 図の実線群である。推定値と実測値の比較については，4 の考察の項で補足する。

4 考 察

実験水槽内に於けるプランクトン群，気泡群，の反射損失の測定結果から，若干の考察を附加することにする。

(a) プランクトン群の反射損失の測定結果は，$a = 0.1$ cm，$g \simeq 1.1$，$h \simeq 1.1$ と数値的に考えた推定値より約 10 db 程度小さく求められた。h 自身，現在の所確認し難いので，理論的推定値は厳密には，保証し難いが，かりに h が $h \simeq 1.1$ 附近に多少変化したとしても，$h > 1$ であれば，その

β_1 に及ぼす影響は小さい。それで一応この種のこの大いさのプランクトンの β_1 として $\beta_1 \simeq 106$db として，その前後を考えてよいと思う。もし $h<1$ であれば，かなり β_1 に影響してくるであろう。

実測値が小さく得られたと思われる原因としては，一つには，プランクトンが沈下していく時の水の擾乱の影響が考えられる。即ち，反射損失測定時のマージン測定の場合，プランクトン群が全部水槽底に沈下してしまっても，暫時（プランクトン沈下量によって異なるが 10 秒前後），反響像が尾を引いて，弱く記されることを観察した。プランクトンのような比較的反射損失の大きいものでは，この影響は無視出来ないと考えられる。この種では，触覚，脚部等の構造が特に関係あるのではなかろうか。又今回の実験では，試料の関係で，分布密度としては平均で，0.2 個/cm³ 程度までしか実験できなかったが，分布はどうしても均一にはならないから部分的には，個々が極めて接近したり，又は触れ合う状態も生じてくるので，こういう状態は一方に於いては，実質的には体積の増加になったり，一方に於いては，数の減少となったりして作用し，結果としては，体積増加的効果の方が表われるのかも知れない。又プランクトンの体長も，2 mm 附近のものをなるべくあつめたが，3 mm 位のものも混在している（体長の 2 mm 以下のものは殆どない）ので少くとも反射損失減少の方向には働いたと考える。プランクトンの分布密度が，もっとずっと大きくなれば，反射損失のプランクトン数 N に対する変化も，或は飽和的になるかも知れない。50 kc の場合，0.2/cm³ 程度の分布密度までは，反射損失はプランクトン数 N の平方根に反比例する傾向は認めた。200 kc では，実測値の変動は 50 kc より大きく，この傾向は，はっきりしない。200 kc の場合は，厳密には Rayleigh 領域から出るので，現象は複雑になる可能性がある。反射損失は 200 kc が 50 kcの場合より反射損失は小さく，プランクトン群の探索ということだけでは，この方が有利であろう。

(b) 気泡群の反射損失の測定に於いては，発生し得た気泡は使用周波数（50 kc と 200 kc）に対しては，共振半径以上の大きいものであるから，このような大いさの気泡は，この周波数領域では，質量リアクタンス要素として作用するから，原音場に対して励振された場合，周波数の高い方が反射が弱くなる性質を，本実験でも，定性的に示した。気泡の大いさも 2 mm 以下のものも混在しており，且，気泡発生移動による水の擾乱もあるだろうから，径 2 mm と想定した推定値より，反射損失が小さい方向にでたことは，了解出来る方向である。気泡の場合も，分布が面密度にして平均して 1.6 個/cm² 程度になると，この大いさの気泡では，反射損失が一定化してくる傾向が見られるが，これは，この程度の分布になってくると，実質的には，空気のスクリーンが出来るものと解される。気泡のような多重散乱性のものが数多くなった場合は，(8)~(9) で与えた群反射の理論は，そのまま適用出来ないと思われる。実験に於いても，反射損失が気泡数 N の平方根に反比例するという関係は，実験の条件下では認め難かった。

5 結　　言

以上 2~4 に於いて述べたことから要約すると，次のことは言える。

(1) 海中小反射体について，単体の場合，球状で且縦振動のみ励振されるものと仮定して，近似的に微小体の音圧反射率 $|\dot{\gamma}_1|$ および traget strength T_s 又は反射損失 β_1 を表示する近似式を誘導した。

群体の場合も，各個体から一回づつ反射されるものとして仮定した場合の反射損失を，上記の β_1 をもとにして求めた。

(2) 水槽実験に於いて，プランクトン群の反射損失の測定を行い，体長 2 mm 程度のものが 0.2 個/cm³ 程度の分布密度までの範囲で，反射損失はプランクトン数 N の平方根に反比例するという近似理論の傾向は 50 kc では認められた。然し 200 kc では，はっきりしない。尚 50 kc の

場合，反射損失の近似的推定値より 10 db 程度，実測値は小さいが，この種の正確を期し難い問題では，比較的よい近似と思う。

(3) 気泡群の反射損失の測定では，群体の反射損失の近似理論は，そのまま適用し難いようあでる。これは気泡のような強い反射性のものは，数や分布方法によって，大きい影響が出るためで，測定方法上の正確さが更に要求される問題である。尚関連した結果として，半径 1 mm 程度の気泡に対しては，200 kc の方が 50 kc より反射損失が大きいことを実験的にも認められた。

文　　献

1) Rayleigh, L. (1917). *Theory of Sound II.* 540 p. London; Lowe & Brydone Ltd.
2) Stenzel, H. (1938). E. N. T. 15 (3), 71.
3) Anderson, V. C. (1950). *J. A. S. A.* 22 (4), 426.
4) Duvall, G. E. (1942). *UCDWR* (M40), 6.
5) Saneyoshi, J. (1951). *Bull. T. I. T.* B, (3), 127.
6) ————. (1953). *Ibid.* B, (6), 13.
7) 実　吉外 (1952). 日本音響学会誌 8 (3), 123.
8) 橋　本外 (1953). 漁船研技報 (4) 143.
9) ———— (1954). 同　　誌 (5) 167.
10) ———— (1955). 同　　誌 (6) 113.
11) ———— (1958). 日本音響学会誌 14 (4), 318.