

# 一探触子法による空中超音波送受信の研究

近畿職業能力開発大学校

附属京都職業能力開発短期大学校

五十嵐

茂

## A Study on Transmitting and Receiving Characteristics of a Single Ultrasonic Transducer in Air

Shigeru IGARASHI

**要約** 多岐にわたる超音波応用の中で、空中超音波の応用には距離計測や物体検知などがある。それらに用いられる超音波センサは、送受信別々のセンサを使用する二探触子法が主流となっており、送受信兼用の一探触子法はあまり使われていないようである。その理由は一探触子法では受信不感帯領域が生じるためと考えられるが、その特性を知り両方式を使い分けることができれば空中超音波による距離計測応用に関して大きな意義があると考えられる。

本稿は、パルス反射法によって距離計測する場合の一探触子法による送受信回路について、二探触子法との回路方式や動作原理の相違を示し、波形の観測によって送受信特性を比較した。その結果、一探触子法では受信不感帯領域が大きく近距離の計測が制限されるが、受信感度は若干低いだけで済むことが明らかになったので報告する。

## I はじめに

近年、超音波の応用は動力的応用から計測的応用まで多岐にわたっている<sup>(1)</sup>。その中の探傷分野では、超音波センサである探触子が送受信別々の二探触子法と送受信兼用の一探触子法<sup>(2)</sup>があり、これらは使い分けられている。一方、空中超音波を利用した距離計測や物体検知などは、一探触子法よりは二探触子法の方が主流のようで、送受信兼用の空中超音波センサは市販されており、かつ回路方式も公開<sup>(3)(4)(5)</sup>されているのにあまり利用されていないようである。

その理由を知ることはもちろん、それら二探触子法と一探触子法の送受信特性の違いを知り、超音波距離計などの応用に両方式を使い分けることができれば大きな意義があると考えられる。

そこで本稿では、一探触子法による送受信回路について、二探触子法の回路方式や動作原理の相違を示し、送受信波形の観測によって受信感度特性、周波数特性などを比較した。特に、一探触子法では送信直後に受

信不感帯領域がありその影響についても調べた。

## II 超音波とは

超音波 (Ultrasonic Wave) とは、JISの用語辞典によれば、「正常な聴力を持つ人に聴感覚を生じないほど周波数が高い音波」と定義されているが、音波との境界を理解しやすくするために20kHz以上の音響的振動を超音波と呼ぶ<sup>(3)</sup> のが一般的とされている。

超音波は、伝搬する媒質すなわち気体、液体、固体や計測方法すなわちパルス反射法、透過法、ドップラ法、共振法など<sup>(2)</sup> によって、また超音波センサの使い方により送受信別々の二探触子法と送受信兼用の一探触子法によって、その応用は多岐にわたっている。

空中超音波による距離計測は、一般にパルス反射法の二探触子法が主流となっており、この方式によって距離計測を行うには、空気中に超音波パルスを送信して、物体からの反射を受信した後、送信タイミングか

ら反射パルスまでの時間をカウンタで計数することにより距離計測可能となる。たとえこれを一探触子法による距離計測に置き換えても原理的には同様となる。

### Ⅲ 一探触子法の回路構成と原理

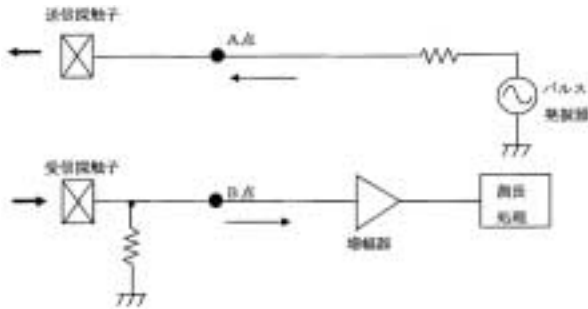


図1 二探触子法の回路構成

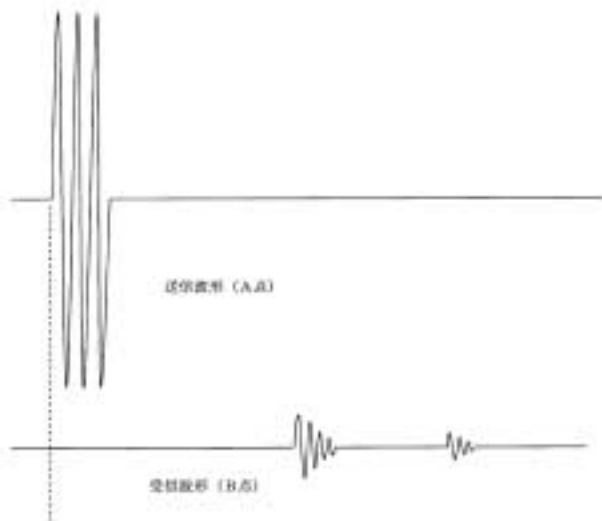


図2 二探触子法の動作波形

図1は一般的な二探触子法の回路構成を示し、図2は動作波形を示している。この場合、送信回路と受信回路が独立しているので送信波(A点)と受信波(B点)が独立して扱える。

今、パルス反射法を一探触子法によって構成しようとする。送信回路と受信回路は同一の超音波センサに接続されることになり、大振幅の送信波が直接増幅器に入り込んで増幅器を飽和させ過大入力となる。そこで、パルス反射法での一般的な性質として、

- ① 送信波と受信波は信号レベルが異なる。送信波は大振幅、受信波は小振幅である。

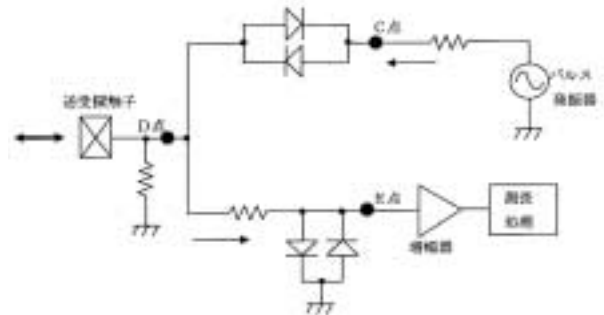


図3 一探触子法の回路構成

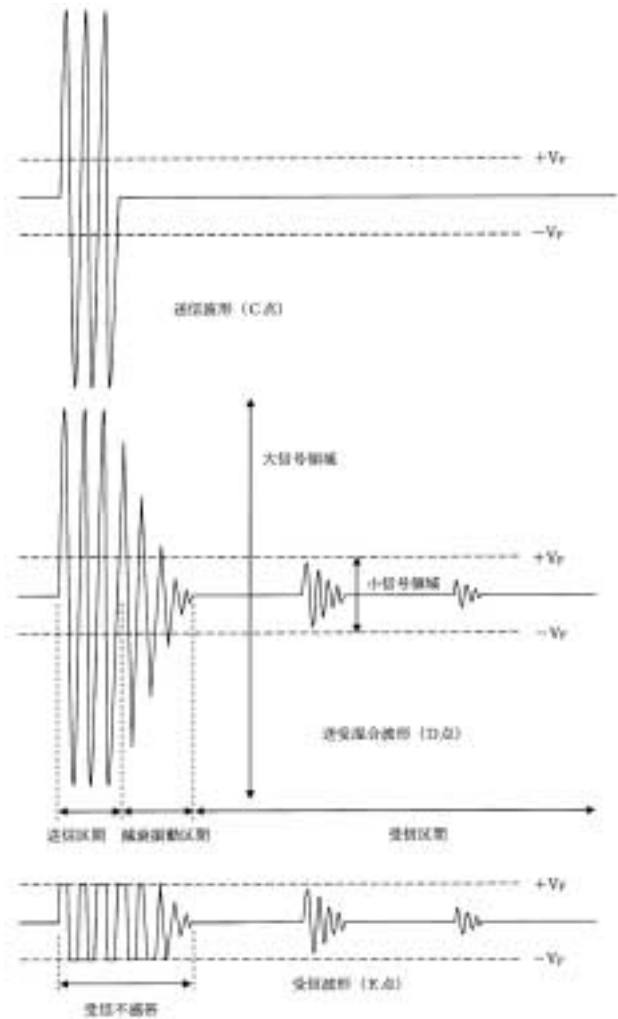


図4 一探触子法の動作波形

- ② 送信区間と受信区間の時間が異なる。すなわち、送信波の後に受信波が到達する。ということを利用する。そのためにダイオードを使用し、その順方向電圧 ( $V_F$ ) を境にショートやオープンとなるスイッチ特性によって送信波と受信波を分離することができる。

図3は一探触子法の回路構成であり、送信回路側のダイオードは送信波となる印加電圧(C点)の大振幅信号は通過するが、受信波(D点)の小振幅信号は発振器に戻らないよう遮断する。また、受信回路側のダイオードは受信波(D点)の小振幅信号のみ増幅器に伝え、送信波の大振幅信号は増幅器に入らないよう $\pm V_F$ の範囲に制限(E点)する。図4はこれらの波形を示し、図のように送信直後に振幅制限された送信波が残る。この領域は送信だけでなく減衰振動も含まれ、受信波がここに埋もれてしまうので受信不感帯となる。

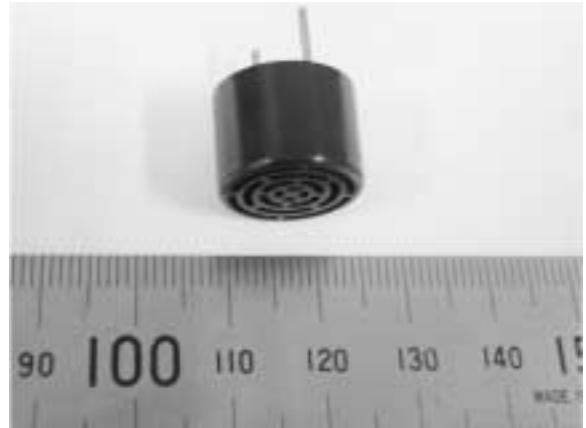


図5 超音波センサの外観

#### IV 実験および考察

一探触子法による送受信回路の性能を、二探触子法や透過法それぞれの送受信波形、受信感度、周波数特性などの測定により比較した。

##### 1 超音波センサ

超音波センサは、村田製作所製の送受兼用空中超音波センサ「MA40B7」を使用した。表1に主な仕様<sup>(4)</sup>を、図5に外観を示す。さらに比較用としての送信用超音波センサは、同社製の「MA40B8S」、受信用は、「MA40B8R」を使用した。

##### 2 送信波形

送信波はファンクションジェネレータにより、40 kHz、 $10V_{P-P}$ の正弦波1~30波のバースト波を超音波センサに印加することにより超音波パルスの送信を行った。図6にバースト5波による送信波形を示す。なお、オシロスコープ画面の電圧スケール表示は10:1プローブを使用しているため、実際の計測値はこの10倍となる。これは以降すべての画面に適用する。

また、パルス反射法によって測定する距離範囲を4 m以内と考え、送信波の繰り返し周期は約25msとした。図7に、送信波の繰り返し周期を示す。

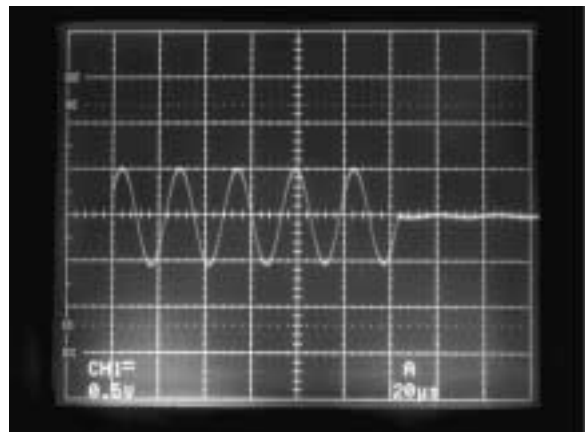


図6 送信波形

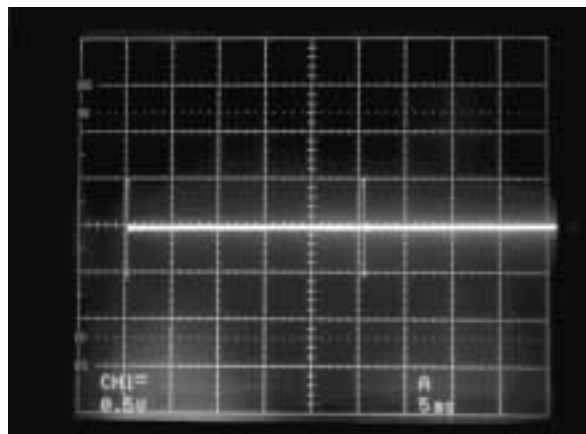


図7 送信繰り返し周期

表1 超音波センサの主な仕様

項目	仕様
公称周波数	40kHz
送受感度	-45dB以上 0dB=10V
指向性	44deg
外形寸法	$\phi 16 \times 12$
質量	2.0g

### 3 増幅回路の特性

使用する超音波センサの送受感度は300mm往復で-45dB<sup>(4)</sup>であるので、電圧10V<sub>P-P</sub>の送信波が受信されると約50mV<sub>P-P</sub>に低下する。したがって、このままでは受信波が観測しにくいので40dBの増幅を行った。図8に製作した増幅器の周波数特性を示す。これによると40kHzの超音波信号は40dB増幅されていることが確認できる。なお、受信感度の算出はオシロスコープ波形のピーク-ピーク間電圧を読み取るが、受信波はすべてこの40dB増幅分が加算されている。これは以降すべてに適用する。

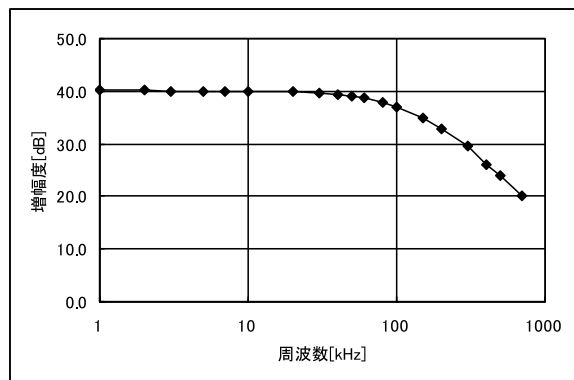


図8 増幅器の周波数特性

### 4 受信波形の比較

送信波のバースト波数を1~30波に設定し、一探触子法、二探触子法による受信波形の比較を行った。

図9に一探触子法の超音波センサの配置を示す。反射板として900mm×900mmの鉄板を使用し、センサの高さを450mm、反射板までの距離L=300mmとした。図10に二探触子法の送信用および受信用の超音波センサの配置を示す。反射板までの距離は一探触子法と同様にL=300mmとした。さらに、二探触子法の反射板による減衰の影響がどの程度であるかを確認するために、反射板を使用しない透過法の受信波形とも比較を行った。図11に透過法の超音波センサの配置を示す。センサ間の距離は反射法の往復である2L=600mmとした。

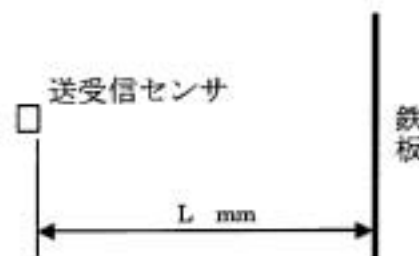


図9 一探触子法のセンサ配置

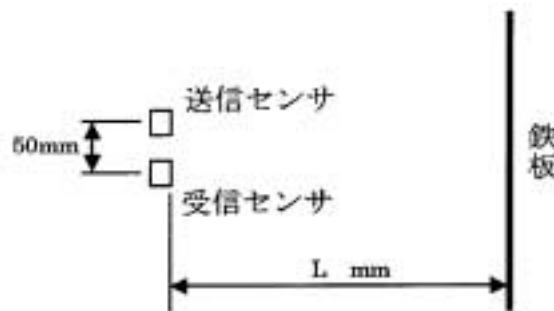


図10 二探触子法のセンサ配置



図11 透過法のセンサ配置

一探触子法および二探触子法について、バースト波の波数を1波、5波、10波としたそれぞれの送受信波形をそれぞれ観測した。図12,14,16は、一探触子法におけるそれぞれバースト1波、5波、10波の送信波形(上)と受信波形(下)を示す。同様に、図13,15,17は二探触子法による波形を示す。これらを比較すると一探触子法による受信波は、送信直後に送信波のパルス幅よりかなり大きな受信不感帯、距離に換算して約150mm付近まで受信波が得られない領域が発生している。また、受信波の振幅は約3dB小さいことがわかる。バースト波数が多いほど受信波の振幅は大きくなるが、受信不感帯の領域が大きくなることもわかる。

図18に透過法による受信波の例としてバースト5波の波形を示す。これは二探触子法の図15と対比することができ、比較するとほぼ同じ振幅、同じ形状となっており、反射板による減衰などの影響はほとんどないと考えてよいことがわかる。

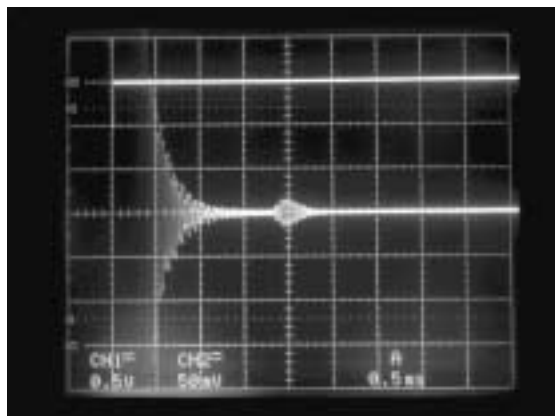


図12 一探・バースト1波の送受信波形

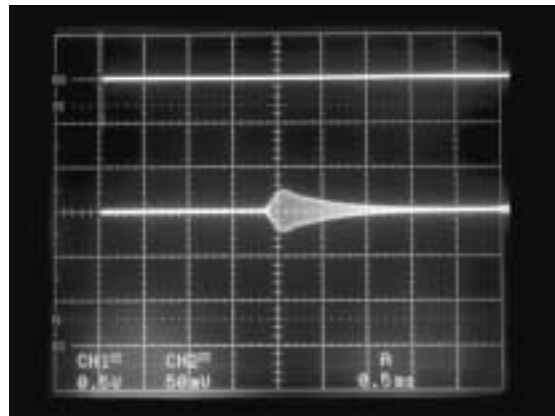


図13 二探・バースト1波の送受信波形

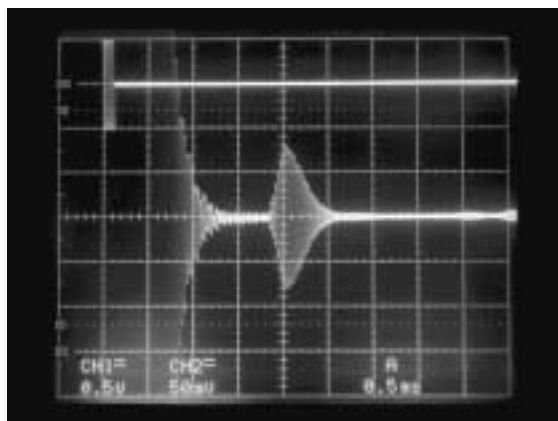


図14 一探・バースト5波の送受信波形

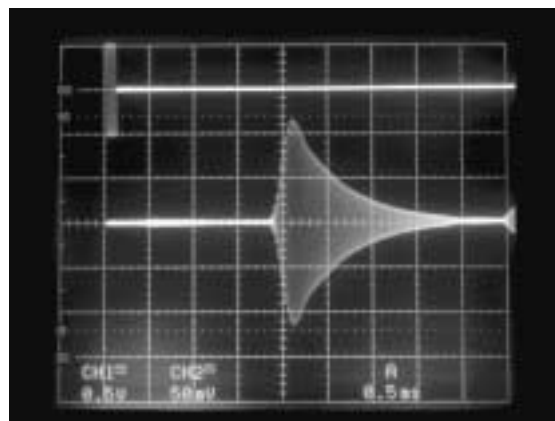


図15 二探・バースト5波の送受信波形

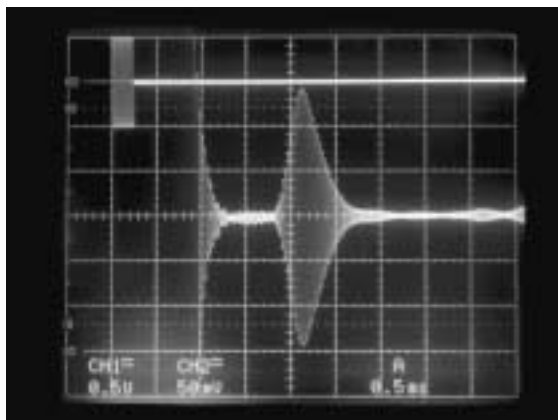


図16 一探・バースト10波の送受信波形

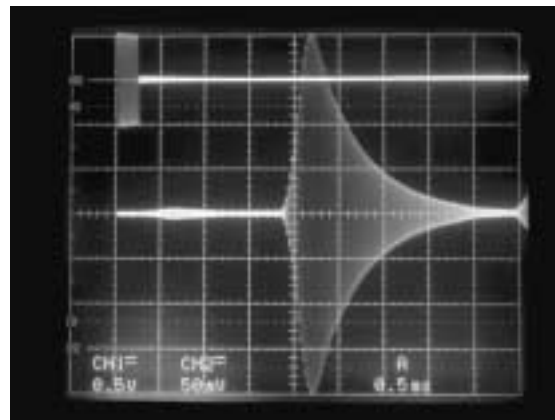


図17 二探・バースト10波の送受信波形

## 5 受信感度の比較

次に、送信波の電圧振幅と受信波の電圧振幅の比、すなわち受信感度について、バースト波を1波～30波に設定したときの変化を比較した。図19にバースト波数と受信感度の関係を示す。バースト波数の増加に比例して受信感度が増加していること、一探触子法の受信感度は他より約3dB低いことがわかる。

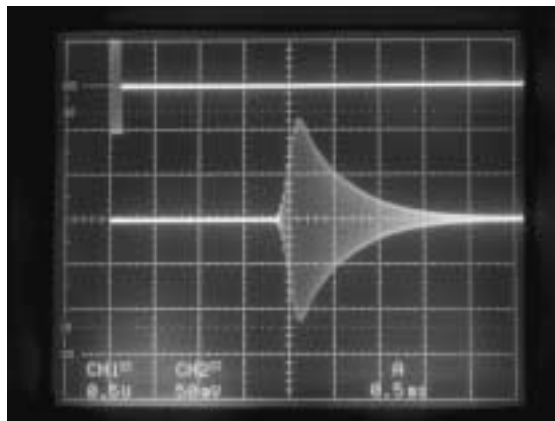


図18 透過・バースト5波の送受信波形

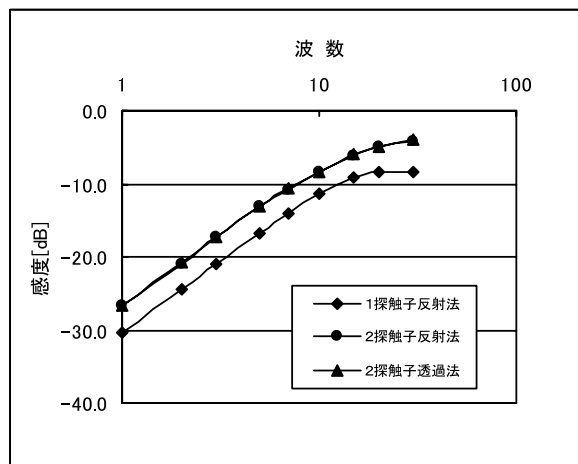


図19 バースト波数と受信感度の関係

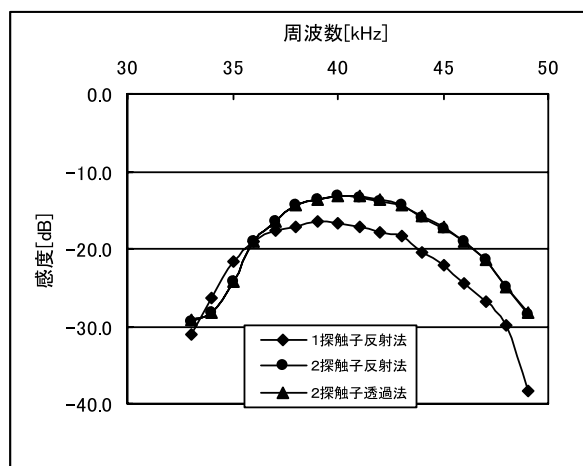


図20 受信感度の周波数特性

## 6 周波数特性の比較

これまで40kHz一定のバースト波であったが、バースト波の波数は5波に固定し、一探触子法、二探触子法および透過法による受信感度の周波数特性の比較を行った。

図20にバースト5波の送信波による受信感度の周波数特性を示す。この特性の評価として最大感度から3dB減衰する帯域幅「-3dB帯域幅」を調べるとそれぞれ約7kHzとなり、これは送受信センサの周波数特性を含めた総合的な周波数特性と考えられる。

この特性は狭帯域と考えられるので送信周波数によって受信感度が変化するため、受信波を最大に得るためには送信周波数の調整が必要となる。また、これは共振特性とも考えられるので送信直後の受信不感帯が送信パルス幅よりもはるかに大きくなるのは、この共振特性のために送信波の残留成分が振動し続け、それが

大きく増幅されることによるものと考えられる。

## 7 受信不感帯の影響

送信波のバースト波数を5波に設定し、センサと反射板との距離L=600~100mmとし、一探触子法、二探触子法による受信波形の比較を行った。

図21,23,25,27に一探触子法の反射板との距離L=600, 400,200,100mmの送受信波形を示し、図22,24,26,28にそれぞれの対比として二探触子法の送受信波形を示す。これによると、一探触子法では反射板との距離が近くなるに従い受信波が送信直後の受信不感帯に埋もれていく様子がわかる。特にL=100mmでは完全に受信波が隠れてしまい距離計測が不可能であることを示している。一方、二探触子法では反射板との距離が近くなっても受信波がはっきりと分離できており、送信直後の近距離まで距離計測が可能であることを示している。

そこで、一探触子法によって距離計測する場合には、この受信不感帯の領域について考える必要があり、近距離まで計測するためには受信不感帯の領域を小さくしなければならない。そのために、たとえば送信波であるバースト波の波数を少なくすればよいが、受信波自体の振幅も図16,14,12のように小さくなってしまふ。同様に、送信波の振幅や増幅器の増幅度などによっても受信不感帯の領域を小さくできるが、やはり受信波振幅に影響する。したがって、一探触子法によって距離計測する場合は、距離計測範囲や反射体の種類などに応じて送信波や増幅度を検討する必要がある。

さらに、両方式ともに反射板との距離によって受信波の振幅が大きく変化していることも確認できる。たとえば距離が2倍になると振幅が約1/2に減衰するなど受信波の減衰が大きい。それは受信波の包絡線の傾きが異なることを示し、受信波振幅のどのレベルの閾値で距離カウントするかにより距離計測における直線性に影響すると考えられる。

これら受信不感帯と受信波振幅の関係や、距離計測の直線性については今後の課題である。

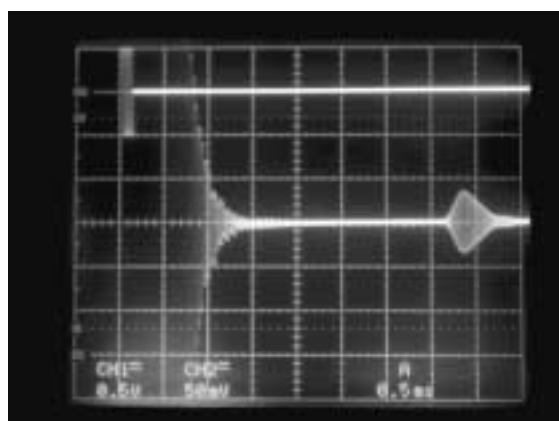


図21 一探の送受信波形L=600mm

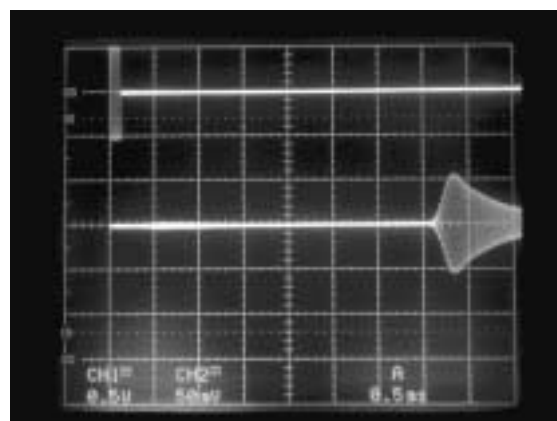


図22 二探の送受信波形L=600mm

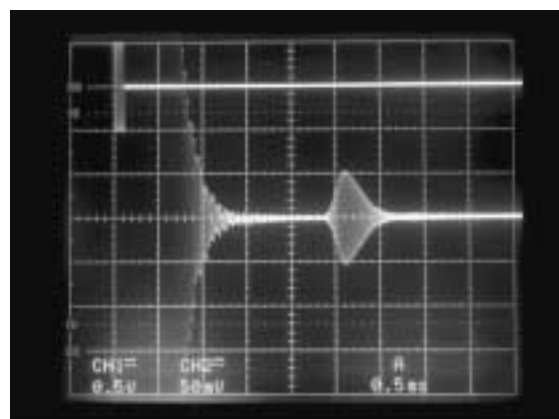


図23 一探の送受信波形L=400mm

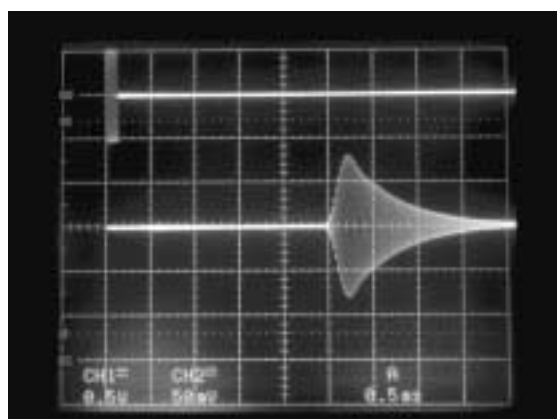


図24 二探の送受信波形L=400mm

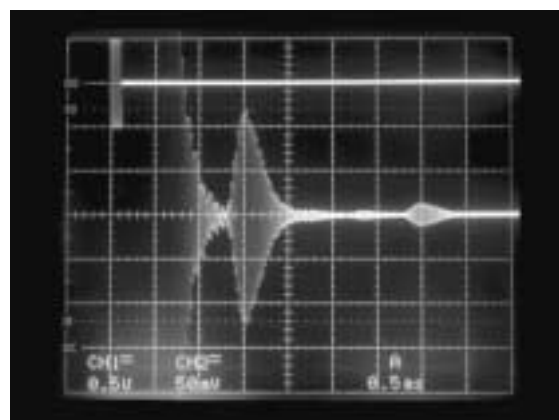


図25 一探の送受信波形L=200mm

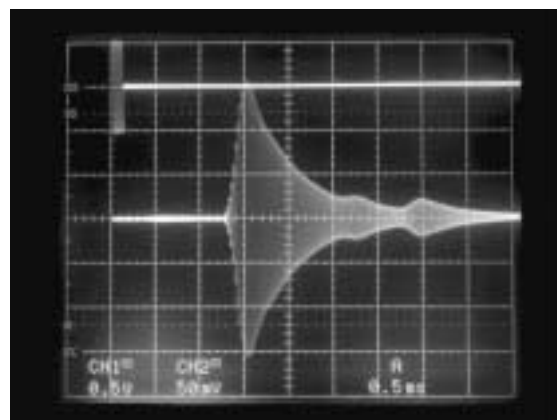


図26 二探の送受信波形L=200mm

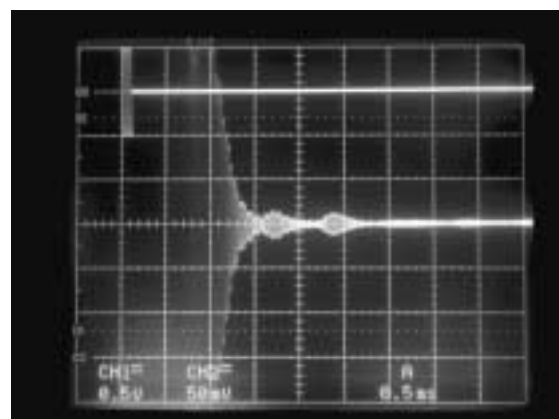


図27 一探の送受信波形L=100mm

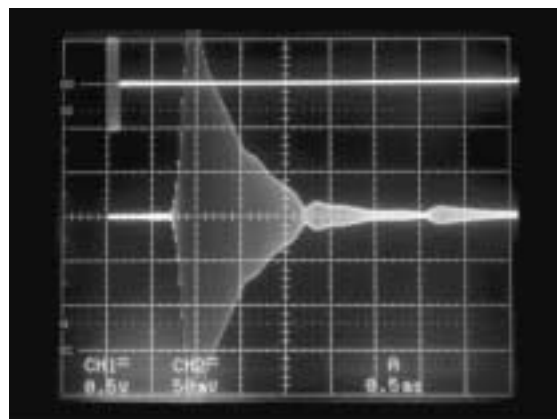


図28 二探の送受信波形L=100mm

## V まとめ

本稿では、一探触子法による送受信回路について、二探触子法との回路方式や動作原理の相違を示し、送受信回路の性能を、バースト波数と受信波形の変化、バースト波数と受信感度、受信感度の周波数特性など波形の観測によって比較し、さらに受信不感帯の影響について調べた。

これらにより、空中超音波のパルス反射法によって距離計測する場合に、一探触子法および二探触子法について明らかになった点をまとめると、

- ① 一探触子法は、ダイオードの順方向電圧 ( $V_F$ ) を境にショートやオープンとなるスイッチ特性を利用することにより構成でき、送信波と受信波の分離ができた。
- ② 一探触子法では、送信直後に受信不感帯があり近距離が計測できない領域が発生する。本実験では送信波パルス幅よりかなり大きな受信不感帯が観測され、距離に換算して約150mm付近まで受信波が得られない領域が発生した。
- ③ バースト波数の増加に比例して受信感度が増加することや、一探触子法による受信感度は二探触子法より約3dB低いことがわかった。受信感度の面では、一探触子法でも二探触子法でもほぼ同等に使用できると考えられる。
- ④ バースト5波の送信波による受信感度の周波数特性は、一探触子法、二探触子法それぞれ-3dB帯域幅で約7kHzとなった。このため送信周波数によって受信感度が変わるので、受信波を最大に得るためには送信周波数の調整が必要となり、送信直後に大きな受信不感帯が生じるのは送信波の残留成分が振動し続けるためと考えられる。

などが明らかになった。

したがって、パルス反射法による距離計測は、一探触子法および二探触子法の両方式でも可能であるが一探触子法では受信不感帯が大きい。一般的に二探触子法の方が主流となっているのはこのためと考えられる。

さらに、本実験で明らかになった

- ⑤ 一探触子法の受信不感帯は、送信波の波数や振幅、増幅度などによって変化するので、一探触子法によって距離計測する場合は、距離計測範囲や反射体の種類などに応じて送信波や増幅度を検討する必要がある。
- ⑥ 距離に対して受信波の減衰が大きいので受信波の包絡線の傾きが異なる。そのため受信波振幅のどの

レベルの閾値で距離カウントするかにより距離計測における直線性に影響すると考えられる。

については今後の課題である。

### [参考文献]

- (1) 井出正男監修、超音波応用、電波実験社、昭和43年4月、P1-7
- (2) 丹羽登、超音波計測、昭晃堂、昭和57年3月、P67、P2-11
- (3) 谷腰欣司、超音波とその使い方、日刊工業新聞社、1994年3月、P100、P1-4
- (4) 村田製作所、空中超音波センサカタログ
- (5) 日本セラミック、空中用超音波センサカタログ