

5-5

送信時と受信時における超音波探触子の応答特性

Response characteristics of ultrasonic probe at transmitting and receiving

○田中 雄介 伊津美 隆 小倉 幸夫
Yuusuke Tanaka Ryu Izumi Yukio Ogura

ジャパンプローブ株式会社 Japan Probe Co., Ltd.

講演概要

超音波探触子にパルス波やバースト波印加時の応答特性や超音波受信時の応答特性を調べた。矩形波印加時は立下り、立上り時に2回のステップ応答により超音波が発生した。正弦波印加時は最初と最後に緩やかなステップ応答が発生し、途中は正弦波に追従した。正弦波形が探触子から送信され、受信時の応答特性は正弦波の特性となった。バースト波印加時は矩形波、正弦波共に最初と最後はステップ応答による周波数が送信され、途中の波は入力周波数に応じた超音波が送信された。停止状態の振動子に矩形波や正弦波を印加するとステップ応答が発生し、振動状態に印加した場合は入力周波数で振動した。

KEYWORDS : 超音波、探触子、送信、受信、応答特性、周波数

1. 緒言

非破壊検査や超音波診断では超音波探触子により超音波を送受信する。超音波送信時は超音波探触子に矩形波や正弦波の電圧を印加する。この時に超音波探触子から送信される超音波は印加した矩形波や正弦波と同じ形にならず、探触子固有の応答波形による超音波が送信される。そのため、任意の超音波波形を送信するためには矩形波や正弦波を印加したときに探触子からどのような超音波が送信されるかを把握する必要がある。また、任意の波形を取得するためには送信特性だけでなく、受信時の応答特性も調べる必要がある。これまでに矩形波と正弦波印加時の送信や超音波受信時の応答を調べた[1]。今回、探触子の矩形波と正弦波印加時の応答特性の他に探触子毎の矩形波印加波形の変化や矩形波の送信特性を利用した高分解能化について述べる。

2. 矩形波、正弦波印加時に送信される超音波

2.1 矩形波印加時における超音波探触子の応答

まず超音波探触子に矩形波を印加したときに送信される超音波を評価する。送信は周波数 2[MHz]、振動子径 10[mm]の水浸超音波探触子、受信は周波数 20[MHz]、振動子径 1[mm]の水浸探触子を用いた。受信探触子の特性は後述するが低い周波数の信号は検出可能である。また、後述の探触子の印加波形変化を少なくするためファンクションジェネレータ(Keysight、33600A)から-5[V]、波数 1、周波数 2[MHz]と 200[kHz]の負の矩形波を印加した。波形は厚さ 10[mm]の亚克力板透過信号で評価した。図 1 に周波数 200[kHz]、図 2 に 2[MHz]の矩形波印加時の受信波形を示す。200[kHz]印加時は負の正弦波形と正の正弦波形が 2.5[μs]の時間差で 1 波ずつ、2[MHz]印加時は 1.5 波の正弦波が検出された。ファンクションジェネレータから探触子へ印加



Figure 1 Waveform applied 200[kHz] square pulse.

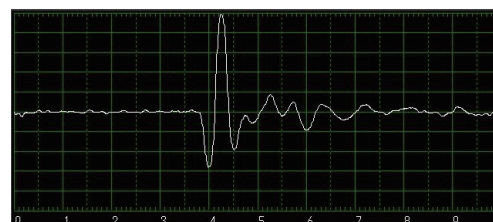


Figure 2 Waveform applied 2[MHz] square pulse.

した波形は図 3 に示す立下りと立上りパルスであり、パルス幅 w が周波数により変化する。200[kHz]では w が 2.5[μ s]で、図 1 の 200[kHz]矩形波印加時の正

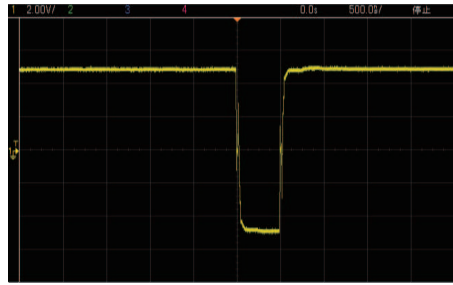


Figure 3 Applied square pulse.

負正弦波の時間差と一致する。従って、超音波は図 4 に示すステップ状の電圧変化時に負と正の超音波がそれぞれ図 5 のように 1 波ずつ送信される。負、正の超音波はパルス幅 w の時間差で送信されたとき、 w が周期 T の半分だと負と正の超音波が合成され振幅が大きくなる。これは超音波振動子は電圧印加時に応力が発生して変形するため、構造体のステップ応答になるためである。マス・ばね・ダンパ系の運動方程式は以下の式

$$f(x) = M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + D \frac{\partial x}{\partial t} + kx \quad (1)$$

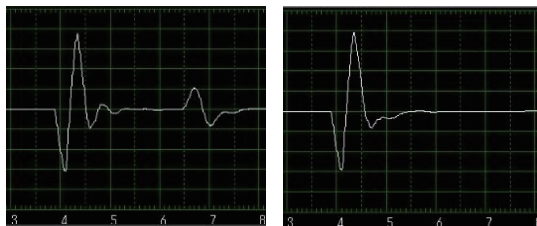
M :質量 D :粘性係数 k :弾性係数

となり、ステップ入力時の変位 x の時間変化は以下の式

$$x(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin\left\{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)\right\} \quad (2) \quad \zeta: \frac{D}{2\sqrt{Mk}} \quad \omega_n: \sqrt{\frac{k}{M}}$$

となる。式(2)の時間変化の一例は図 6 のようになり、正弦波項があるためステップ応答は振動を示す。また、超音波振動子は弾性、粘性、慣性があるためステップ入力時にも一定の遅れ時間が発生する。ステップ入力自体は電圧変化が高速のため超音波探触子の最大応答速度で超音波が発生する。ピーク間の半周期時間差の逆数から計算すると図 1 の負パルスは 2[MHz]、正パルスは 1.8[MHz]となった。従って、ステップ応答での探触子の応答速度は共振周波数と同程度になる。

次にパルスレシーバ(ジャパンプローブ、JPR-600C)から矩形波を印加したときの応答を調べた。送信探触子は振動子径 10[mm]で周波数 2[MHz]と 5[MHz]の水浸探触子、受信は前節と同様の探触子を用いて、厚さ 10[mm]の亚克力板透過信号で評価した。印加電圧は -30[V]、波数 1 の負の矩形波で周波数 2[MHz]の探触子へは 200[kHz]と 2[MHz]、周波数 5[MHz]の探触子へは 200[kHz]と 5[MHz]に設定した。それぞれの探触子へ矩形波を印加したときの受信波形を図 7、図 8 に



(a) 200[kHz] (b) 2[MHz]

Figure 7 Waveform of 2[MHz] probe applied 200[kHz] and 2[MHz] square pulse.

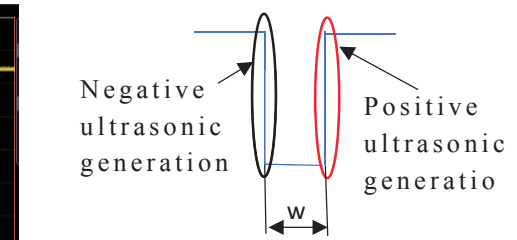
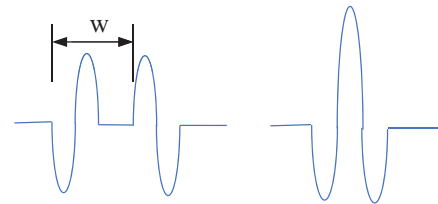


Figure 4 Ultrasonic generation applied square pulse.



(a) Pulse width: w (b) At $w=T/2$

Figure 5 Ultrasonic generation applied square pulse.

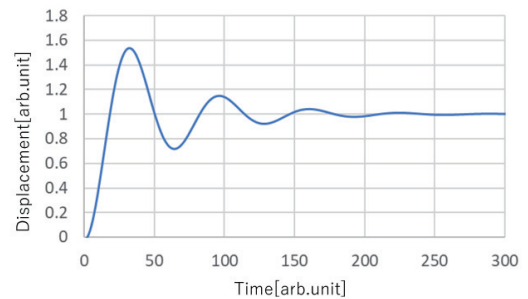
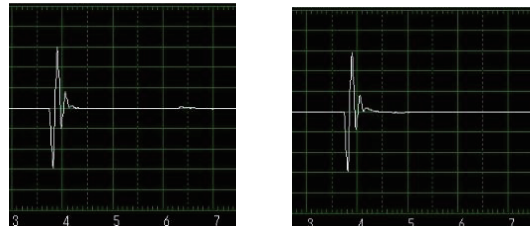


Figure 6 Step response at Mass-Spring-Damper system.

送受信探触子は振動子径 10[mm]で周波数 2[MHz]と 5[MHz]の水浸探触子、受信は前節と同様の探触子を用いて、厚さ 10[mm]の亚克力板透過信号で評価した。印加電圧は -30[V]、波数 1 の負の矩形波で周波数 2[MHz]の探触子へは 200[kHz]と 2[MHz]、周波数 5[MHz]の探触子へは 200[kHz]と 5[MHz]に設定した。それぞれの探触子へ矩形波を印加したときの受信波形を図 7、図 8 に



(a) 200[kHz] (b) 5[MHz]

Figure 8 Waveform of 5[MHz] probe applied 200[kHz] and 5[MHz] square pulse.

示す。2[MHz]の探触子は 200[kHz]印加時に負のパルスと小さな正のパルスが検出され、2[MHz]印加時は負のパルスが検出された。5[MHz]の探触子は 200[kHz]印加時と 5[MHz]印加時にほぼ同じ波形が検出された。正パルス波形の変化は探触子ごとの印加波形変化が原因であり 2.4 節で述べる。

2. 2 正弦波印加時における超音波探触子の応答

次に正弦波をファンクションジェネレータ(Keysight、33600A)から印加したときの応答を述べる。探触子は前節の 5[MHz]を用い、図 9 に示す波数 1 の負の正弦波を印加した。評価は同様に厚さ 10[mm]の亚克力板透過信号を周波数 20[MHz]、振動子径 1 [mm]の探触子の受信信号で評価した。印加電圧は 5[V]、周波数は 1[MHz]と 5[MHz]に設定した。図 10 にそれぞれの周波数印加時の受信波形を示す。振幅は 1[MHz]より 5[MHz]印加時が 47%大きくなった。波形の応答速度に着目すると、表 1 の結果となった。1[MHz]印加時の A-B 間や D-E 間の応答が B-C や C-D 間の応答より早かった。5 [MHz]印加時はピーク E が不明だが、およそ 5 [MHz]相当の応答になった。探触子に印加した図 9 の正弦波形は正弦波発生時(A)と終了時(B)で電圧が急激に変化するため、A で負のステップ応答、B で正のステップ応答が発生したと考えられる。ただし、矩形波のステップ入力と異なり、電圧が最大値まですぐに変化しないので、電圧変化が低いステップ応答となる。B-D 間の応答は正弦波の入力波形に追従した波形となった。探触子の共振周波数と異なるため 5[MHz]の方が大きい振幅であるが、共振周波数より低い周波数では開始時と終了時のステップ応答以外は正弦入力波形に追従すると考えられる。

図 9 に示す正弦波印加時の受信波形を示す。振幅は 1[MHz]より 5[MHz]印加時が 47%大きくなった。波形の応答速度に着目すると、表 1 の結果となった。1[MHz]印加時の A-B 間や D-E 間の応答が B-C や C-D 間の応答より早かった。5 [MHz]印加時はピーク E が不明だが、およそ 5 [MHz]相当の応答になった。探触子に印加した図 9 の正弦波形は正弦波発生時(A)と終了時(B)で電圧が急激に変化するため、A で負のステップ応答、B で正のステップ応答が発生したと考えられる。ただし、矩形波のステップ入力と異なり、電圧が最大値まですぐに変化しないので、電圧変化が低いステップ応答となる。B-D 間の応答は正弦波の入力波形に追従した波形となった。探触子の共振周波数と異なるため 5[MHz]の方が大きい振幅であるが、共振周波数より低い周波数では開始時と終了時のステップ応答以外は正弦入力波形に追従すると考えられる。

2. 3 探触子の共振周波数と異なる周波数での駆動
負の矩形波、負の正弦波印加時に探触子の共振周波数と異なる周波数に設定した場合を調べた。前節までに共振周波数より低い周波数を印加したときの応答について、矩形波は図 1 のように立下りと立上りの両方のステップ応答による共振周波数程度の正弦波が発生し、正弦波は図 10(a)のように発生時と終了時のステップ応答と正弦波形に追従した波形が混じった波形となる。一方、共振周波数より高い周波数を印加した場合は異なる応答を示す。ファンクションジェネレータから 2.1 節の 2[MHz]の探触子へ 10[MHz]の矩形波と正弦波を印加し、前節と同様の条件で厚さ 10[mm]の亚克力板透過信号を評価した。10[MHz]矩形波、正弦波印加時の波形を図 11 に示す。矩形波印加時のピーク A-B 間の応答速度は 2.2[MHz]となった。正弦波印加時は 2 周期の信号が発生した。

矩形波 10[MHz]印加時の応答は図 12 のように考えられる。立下りパルスの応答により 2[MHz]の負の正弦波が発生するが、正弦波の途中で矩形波の立上りパルスにより正の正弦波が発生する。負の正弦

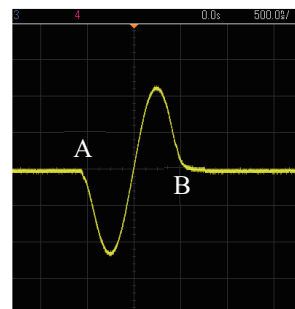
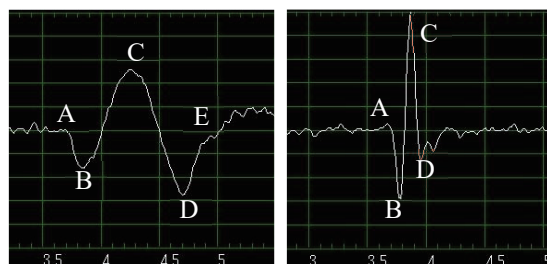


Figure 9 Sine wave applied to the probe.



(a) 1[MHz] (b) 5[MHz]

Figure 10 Waveform of 5[MHz] probe applied 1[MHz] and 5[MHz] sine pulse.

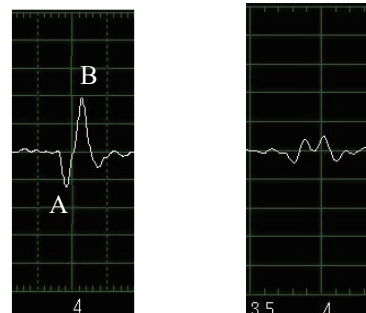
Table 1 Time and frequency equivalents for each section A-E.

(a) 1[MHz] applied.

Section	Time[μs]	Frequency[MHz]
A-B	0.13	1.92
B-C	0.41	1.22
C-D	0.46	1.09
D-E	0.14	1.79

(b) 5[MHz] applied.

Section	Time[μs]	Frequency[MHz]
A-B	0.050	5.00
B-C	0.094	5.32
C-D	0.086	5.81
D-E	E part unknown	



(a) Square wave (b) Sine wave

Figure 11 Received waveforms in applying 10 [MHz] square and sine waves.

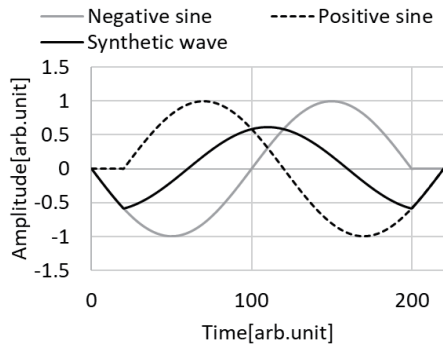


Figure 12 Synthesize of a negative sine wave and a delayed positive sine wave at square pulse.

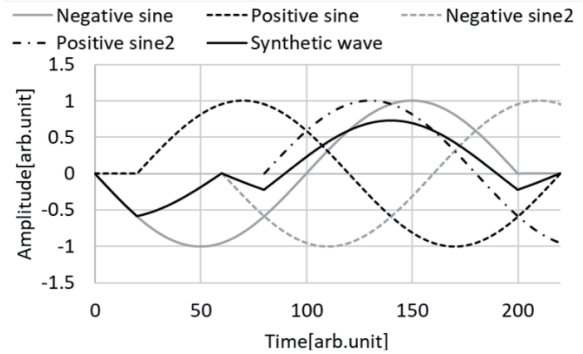


Figure 13 Synthesize of a negative sine wave and a delayed positive sine wave at sine pulse.

振動が無くなってはいないため、負と正の正弦波が混じった波形と考えられる。一方、正弦波印加時は図 13 のように考えられる。矩形波と同様に立下り時に負の超音波波が発生し、印加正弦波の極小値からの戻りにより立下り途中で正の超音波が発生する。印加正弦波は極小値、極大値でそれぞれ正、負の超音波が発生し、負の正弦波は終了時に正のステップ応答が発生するため、負と正の正弦超音波が 2 回ずつ送信され、合成された結果が 2 周期の信号と考えられる。図 13 は 4 つの理想的な正弦波の合成で、実際は正弦波の発生時期、振幅が異なるため波形が異なるが合成波は疑似的に 2 周期の波がとなる。

これらの結果から、共振周波数より低い周波数を印加したとき、矩形波では立下りパルスと立上りパルスでそれぞれ超音波が発生し、正弦波では最初と最後にステップ応答、途中は正弦波形に追従する超音波が送信される。途中の超音波は共振周波数ではないため振幅が低下する。一方、共振周波数より高い周波数を印加したとき矩形波、正弦波ともに最初のパルスでステップ応答が発生するが、応答途中で逆方向の電圧変化が発生して逆方向の応答が発生する。矩形波は 2 回の電圧変化であるが、正弦波は極小値、極大値、終了時など複数の急激な電圧変化がある。矩形波は 2 つの正弦波の混在、正弦波は 4 つの正弦波が混在する波形になり、複雑な挙動を示す。

2. 4 超音波探触子ごとの印加波形の変化

パルサレーバから矩形パルス印加する際、理想的な矩形パルスではなく探触子ごとにパルスの印加形状が変化する。図 14 は 5 [MHz] の広帯域水浸探触子にパルサレーバから 5 [MHz] の矩形パルスを印加したときの実際の入力波形である。立下りはすぐに応答しているが、立上りは緩やかな変化となった。この場合、立上りのステップ応答はほとんど発生せず、立下りのステップ応答による超音波が主に送信される。図 8 のアクリル透過信号の評価では 200 [kHz]、5 [MHz] 印加時の両方でほぼ同じ波形が検出され、立下りパルスからの超音波だけが検出されたことがわかる。図 7 の 2 [MHz] 探触子では緩やかな立ち上がりでも少し応答し、小さな振幅の超音波が発生した。印加波形変化は探触子とパルサレーバの組合せにより決定し、例えば図 15 のソフトプローブでは急峻な立上りが半分程度になる。この特性とパルサレーバの送信パルス幅制御を利用して波形の高分解能化などが可能になる。

2. 5 矩形波の送信特性を利用した高分解能化

印加波形の変化を上手く使うことで高感度化、高分解能化が可能になる。一例としてソフトプローブを用いた溶接部計測の高分解能化を述べる。金属の計測は高分解能化に探触子の整合層にセラミックを用いるが、ソフトプローブなどは柔らかい整合層を用いる必要があり金属での計測は信号の尾引きが発生する。10 [MHz] のソフトプローブ 10K5N を用いた隅肉溶接部の計測波形を図 16 に示す。10 [MHz] と 4 [MHz] の矩形波をパルサレーバから印加

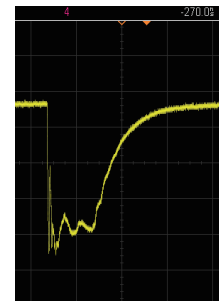


Figure 14 Waveform variation of square pulse for broadband probe.

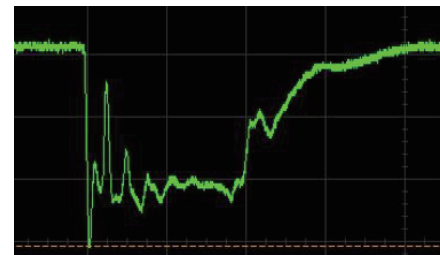


Figure 15 Waveform variation of square pulse for soft probe.

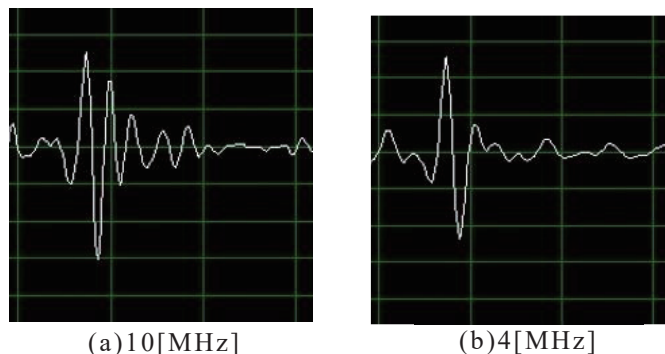


Figure 16 Detection waveforms of a corner welding part.

したとき、4[MHz]の方が信号の尾引きが少なく分解能が高かった。この理由について図17で説明

できる。立下りパルスにより尾引きのある負の超音波振動が発生するが、立上りパルスにより正の超音波振動が発生する。この正の超音波振動をタイミングよく負の超音波振動の尾引き部分にぶつけることで尾引き信号を相殺できる。従って、パルスレシーバによる矩形パルスとパルス幅制御により高分解能の超音波が送信可能になる。

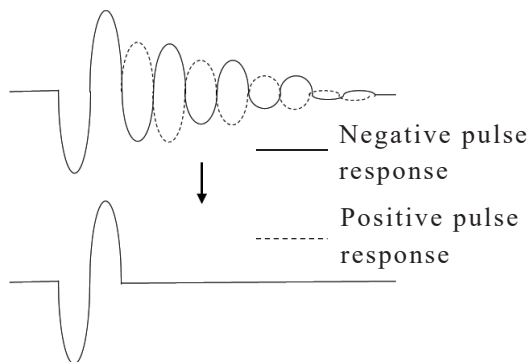


Figure 17 Elimination of signal tailing by synthesis of positive and negative square pulse responses.

3. 超音波受信時における超音波探触子の応答

3.1 応答周波数より低い周波数での受信

前章で送信特性を評価したが、受信特性もセンサとして評価を行う上で重要となる。送信特性は矩形波と正弦波の応答で評価したが、超音波は正弦波で送信されるため受信特性の評価は正弦波の応答となる。まず探触子の周波数より低い周波数の超音波を受信したときの応答を調べた。装置は前章までと同様で、アクリル板の透過信号で評価した。探触子は送信を2[MHz]、受信を5[MHz]とした。パルスレシーバから-40[V]、波数1、周波数2[MHz]の負の矩形波を印加した。受信波形を図18に示す。2[MHz]で送受信した図7と比較するとA部分やB部分に5[MHz]程度の高周波信号が発生した。これは受信時にステップ応答による探触子由来の信号が検出され、2[MHz]の受信信号と混じったと考えられる。従って、受信特性は最初の受信時のステップ応答と正弦波由来の受信信号が合成された波形となる。送信時は正弦波終了時のステップ応答もあるが、超音波の伝搬は自由振動であるため、終了時のステップ応答は小さいと考えられる。また、ステップ応答自体は周波数が高くなるほど振幅が小さくなるため、最初の受信時のステップ応答も高周波ほど小さくなる。そのため、20[MHz]の探触子で2[MHz]の超音波受信など、共振周波数より小さな周波数の超音波を受信するときは受信信号の大きさに対して、ステップ応答の影響を非常に小さくできるので受信信号の評価に適する。

3.2 応答周波数より高い周波数での受信

一方、前節と同様の条件で探触子の周波数より高い周波数で受信した場合は図19の結果となる。探触子は送信を5[MHz]、受信を2[MHz]とした。5[MHz]で送受信した図8と比較するとC部分に何らかの高周波信号があるが、図18ほど顕著に検出されなかった。図18、図19で立下り始めSから最初のピークP1、P2までの時間と相当周波数は表2となり、受信探触子のステップ応答周波数より高速で応答しなかった。これらの結果から探触子の応答周波数より高い周波数で受信した場合、信号は検出されるが応答周波数は受信探触子固有のものとなる。ただし、送信時の応答のように応答途中で逆方向の信号変化などで見かけ上早い応答になる可能性は考えられる。



Figure 18 Waveforms with a transmitting 2 [MHz] and receiving 5 [MHz] probe.

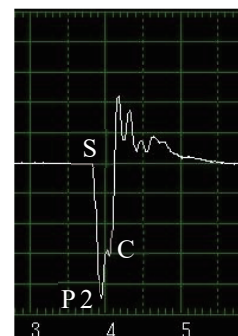


Figure 19 Waveforms with a transmitting 5 [MHz] and receiving 2 [MHz] probe.

4. バースト波印加時の応答

波数が多いバースト波印加時の応答について述べる。250[kHz]、直径 20[mm]の空中超音波探触子を空中で 50[mm]の距離で対向させて配置し、透過信号を評価した。ファンクションジェネレータから矩形波と正弦波で 200[kHz]、5[V]、波数 50 の電圧を送信探触子へ印加した。矩形波と正弦波印加時の受信波形を図 20、図 21 に示す。最初と最後が 250[kHz]、中央は 200[kHz]の波形となった。矩形波と正弦波の両方で最初と最後がステップ応答による探触子固有の周波数、中央は印加周波数で応答した。これらの結果から、停止状態で矩形波や正弦波を印加した場合、振動状態から電圧を急停止した場合はステップ応答による超音波、振動状態への印加は入力周波数で駆動すると評価できる。ただし、共振周波数から離れた周波数では振幅が低下する。この入力では停止状態から電圧最大で印加したためステップ応答が発生したが、図 22 のように開始時は徐々に電圧を上げ、停止時は徐々に電圧を下げればステップ応答の影響を小さくできる。この時の受信波形は図 23 となり、200[kHz]のみのバースト波が受信された。従って、停止状態からの電圧印加またはバースト波印加からの停止は周波数に関係なくステップ応答が発生し、振動状態への電圧印加は矩形波、正弦波に関わらず入力周波数での駆動が可能である。

5. 結言

矩形波や正弦波印加時に送信される超音波、受信時の探触子の応答特性、バースト波印加時の応答特性について調べた。電圧変化時のステップ応答や正弦波印加時の応答により複数回探触子から超音波が送信され、それらが合成された波形が最終的な送信波形となった。送信される超音波は正弦波形で、受信時の応答特性は正弦波の送信特性と近似した。また、印加する矩形波は探触子とパルスレーザの組合せで変化し、その特性とパルス幅変調を利用することで高分解能計測が実現できた。バースト波印加時の応答は開始時と終了時にステップ応答、途中は印加周波数の応答となった。

参考文献

[1]田中雄介、伊津美隆、小倉幸夫、超音波探触子の送信時と受信時における応答特性、2023 年日本音響学会秋季研究発表会講演論文集 1-2-2 pp.17-20(2023)

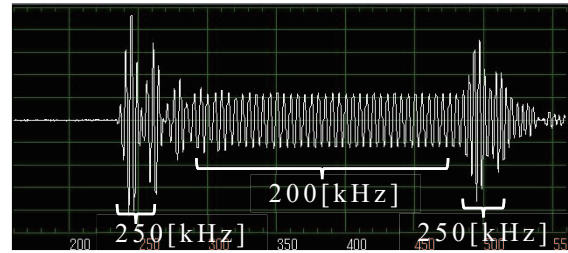


Figure 20 Waveform at applied 50 square waves.

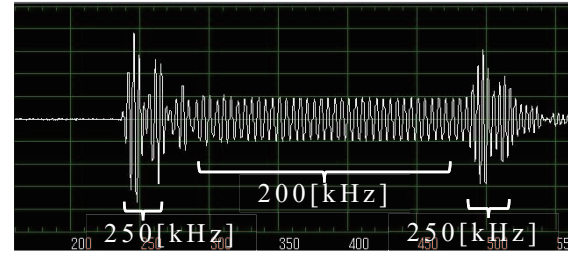


Figure 21 Waveform at applied 50 sine waves.

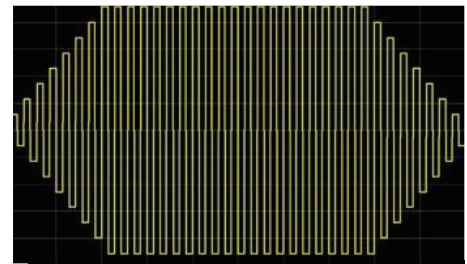


Figure 22 Modulated square wave example.

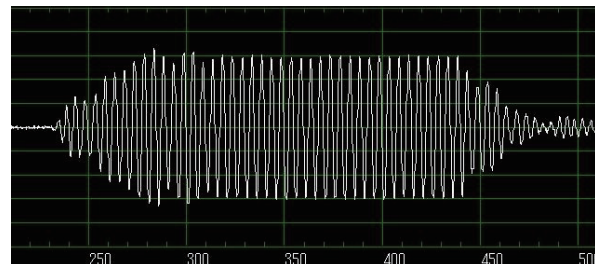


Figure 23 Waveform applied modulated square wave.