

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：53601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04351

研究課題名（和文）機械的アナログ領域における相殺パルスを利用した高精度異常診断システムの開発

研究課題名（英文）Development of the accurate defect detection system using an antiphase pulse in mechanical analogue domain

研究代表者

門脇 廉（Kadowaki, Ren）

長野工業高等専門学校・機械ロボティクス系・講師

研究者番号：10735872

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：固体表面近傍の欠陥を超音波パルスで検査する際、表面からの反射波に欠陥からの反射波が埋没して欠陥検出が難しくなる。本研究ではこれを低減するために超音波探触子と検査対象物の間に挟む遅延材の一部を空气中に開放し、表面からの反射波に対する相殺パルスを生成した。提案手法により表面からの反射波が1/2以下に低減され、欠陥の検出感度が向上した。また、数値シミュレーションを通して欠陥の影響が相対的に拡大されることも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では電氣的、電子的な処理によらない機械的かつアナログな信号処理により不要な超音波を低減し、超音波検査の精度を向上することに成功した。この機械的アナログ領域での信号処理は、超音波のように機械的な振動を伴う信号の新しい処理方法として今後学術的に発展する余地がある。また、提案手法は電氣的、電子的信号処理と併用できる。そのため、広範な活用が期待されるAIを用いた異常診断において、そのデータの前処理に利用できると期待される。

研究成果の概要（英文）：It is difficult to detect the near surface defect with ultrasonic pulses because the reflected pulse from the surface is superimposed on the reflected pulse from the defect. The reflected pulse from the surface obscures the pulse from the defect. In this study, we decreased the reflected pulse from the surface using its antiphase pulse which was a reflected pulse from the boundary between the delay line and the air. The reflected pulse from the surface was reduced by less than a half by the proposed method in a basic experiment. Using the proposed method, the detection sensitivity of the near surface defect was improved. The numerical simulation showed that this improvement of the detection sensitivity came from relative increase of the reflected pulse from the defect to the reflected pulse from the surface.

研究分野：機械力学

キーワード：異常診断 超音波 アナログ信号処理 信号処理 非破壊検査

1 . 研究開始当初の背景

機械やインフラ構造物などを構成する部材では、周囲の腐食環境や接触の影響を受ける表面、またはその直下に欠陥が生じる場合が多い。これらは重大な事故の起点となりうるため、製造や使用の現場では超音波などを用いた非破壊の異常診断が行われている。しかし、主要な方法の一つであるパルス法超音波診断では、超音波を当てても欠陥を音源とする反射波と表面を音源とする反射波が干渉してしまい、診断できないことが多い。この問題を解決するには何らかの方法で表面からの反射波を低減することが必要である。超音波が物理的に伝播する環境の中で表面からの反射波を低減できれば、波形の観察のみで直感的に異常を診断できたり、上述のデジタル信号処理をより有効に機能させる下処理となったりする可能性がある。

2 . 研究の目的

本研究の目的は、固体表面の直下にある微小な亀裂、空孔等の欠陥を高精度に検出するために、パルス法超音波診断の計測系に含まれる機械的アナログ領域、すなわち超音波の伝播経路でノイズ除去処理を行う新しい異常診断システムを開発することである。具体的には、超音波探触子と対象物の間に挿入される遅延材の形状を工夫し、固体表面からの反射波を打ち消せる新たな反射波を生成する。これにより表面からの不要な反射波を新たな反射波と相殺させ、欠陥からの反射波を相対的に拡大して観察できるシステムとする。

3 . 研究の方法

(1) 機械系アナログ領域における相殺パルスの生成

提案手法では、表面からの反射波に欠陥部からの反射波が埋もれている場合を想定し、表面からの反射波を逆位相の反射波で打ち消す。これにより、欠陥部からの反射波を際立たせ、異常診断を高感度化する。そのために、提案手法では超音波探触子と対象物の間に挟む遅延材の形状と物性を工夫する。具体的には以下の三つの手順で提案手法を実現する。

- #1 対象物、遅延材、空気の音響インピーダンスを z_o , z_d , z_a と表すとき、 $z_o > z_d > z_a$ となる材料を遅延材に選ぶ。
- #2 図1のように遅延材の一部を対象物に接触させる一方で、別の一部を空气中に開放する。接触側は $z_o > z_d$ であるため、超音波に関して固定端での反射となるのに対し、開放側は $z_d > z_a$ であるため自由端での反射となる。また、接触側と開放側で遅延材の長さを等しくし、双方からの反射波を同時に受信する。その結果、二つの反射波は逆位相となる。
- #3 遅延材先端における接触側の面積と開放側の面積の比を適切に与え、二つの反射波を相殺させる。

ここで、手順#3 において設定すべき面積比は、理想的には接触側の反射率と開放側の反射率の絶対値の逆比になる。したがって、開放側の反射率を R_a , 接触側の反射率を R_o とすると、接触側の面積 S_o と開放側の面積 S_a の理想的な比は $S_o : S_a = |R_a| : |R_o|$ と表せる。

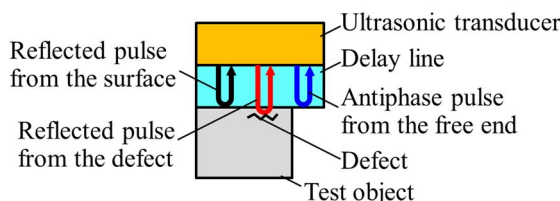


図1 Proposed sensitivity improvement using the antiphase pulse provided from the delay line.

本研究ではメタクリル樹脂製遅延材を介してアルミ合金製対象物の欠陥を検査する場合を想定する。このとき、反射率を計算するための物性値を表1に示す。この値を用いて理想的な面積比を算出すると、 $S_o : S_a = 0.594 : 0.406$ のときに二つの反射波が相殺する。

表1 Material properties of the mediums.

	Density ρ (kg/m ³)	Sound velocity c (m/s)
Methacrylate	1190	2730
Aluminum alloy	2690	6420

このほか、本研究では反射波の解析に際して時系列波形だけでなく複素ウェーブレット変換に基づく瞬時振動数を算出し、欠陥検出の指標とする。瞬時振動数とは波形の各瞬間における主要な振動数成分であって、パルス同士の干渉に敏感であることがわかっている(文献)。

(2) 実験的検討

はじめに基礎実験として、提案手法で表面からの反射波を低減できることを確認し、接触媒質を介した接触において表面からの反射波を最小化する。次いで高感度化実験として、人工的に設けた欠陥の検出感度の向上を確かめる。

実験系の模式図を図2に示す。対象物は厚さ20 mmのアルミ合金製ブロック、遅延材は厚さ5 mmのメタクリル樹脂製円板とし、探触子には有効径6 mm、公称周波数10 MHzの製品(A544S-SM, オリンパス)を用いる。この探触子をパルサーレシーバー(DPR300, Imaginant)で加振し、反射波をオシロスコープで記録する。探触子-遅延材、遅延材-対象物間にはグリセリンを主体とした接触媒質を薄く塗布する。提案手法を適用する場合はブロックのエッジ部で遅延材の一部を空気に開放し、適用しない場合は全面をブロック表面に接触させる。

高感度実験のために設ける欠陥はブロック表面に彫った直径1.0 mm、深さ50 μmの穴とする。同じ穴を対象物のエッジ近傍とそれより内側に設け、エッジ近傍の穴には提案手法を適用する一方、より内側の穴には従来通り遅延材の全面を当てて反射波を観察する。各手法において、穴を含む欠陥部に超音波を投射した場合と、穴のない正常部に超音波を投射した場合を比較する。

これらの実験では探触子と遅延材の位置を図3の装置で移動させる。この装置では探触子と遅延材をばねで押し付ける。

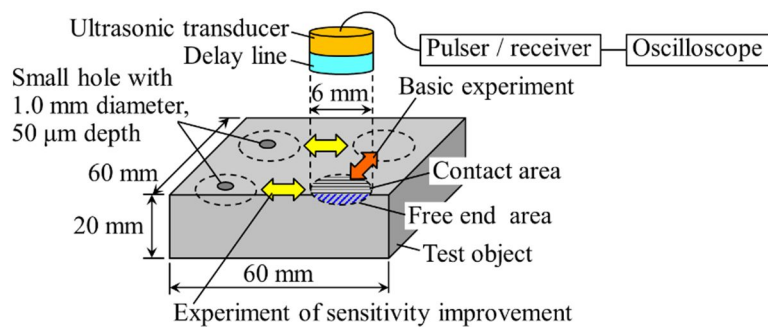


図2 Schematic view of the two experiments.

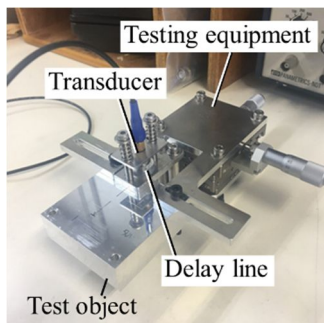


図3 Testing equipment with a test object.

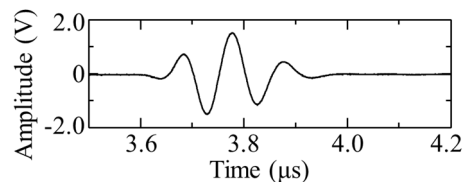


図4 Incident pulse for the experiments and the numerical simulation.

この実験と次節の数値シミュレーションで用いる探触子は同一であり、その出力は図4のようになっている。探触子の出力波形は直接得ることができないため、厚さ5 mmの無垢なメタクリル樹脂板に探触子を押し付け、板の内部を1往復した波形を記録したものである。およそ4周期からなる単一パルスであるとわかる。

(3) 接触媒質を考慮した数値シミュレーション

実験結果について考察するため、接触媒質を考慮した場合の受信波を数値シミュレーションで求める。図5のように各媒質間の境界で反射した超音波が探触子に戻ると仮定し、光線追跡法を用いて各反射波を重ね合わせて受信波 $u(t)$ を算出する。

$$u(t) = \sum_{n=1}^4 u_n(t) \quad (1)$$

各反射波 $u_n(t)$ ($n=1 \sim 4$)は探触子から投射されるパルス $u_0(t)$ とすると次のように書ける。

$$u_n(t) = A_n u_0(t - t_n) \quad (2)$$

振幅 A_n は各媒質間の境界における反射率 R_j や透過率 T_k 、超音波の投射面全体の面積に対する反射面の面積の割合 r_n の総乗として次式で表せる。

$$A_n = r_n \prod_j R_j \prod_k T_k \quad (3)$$

本シミュレーションで用いる物性値は表 1 に加え，グリセリンの密度 (1261 kg/m³) と音速 (1923 m/s) である．また，式(2)の受信時刻 t_n は各媒質中の経路長を音速で割って得られる．

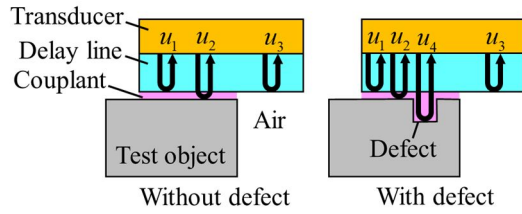


図 5 Schematic view of the simulation.

このほか，投射面全体の面積を S とすると，式(3)の面積比 r_n は反射面が提案手法における開放側ならば S_n/S ，接触側ならば S_0/S である．

4. 研究成果

(1) 相殺パルスによる表面反射波の低減

図 6 に基礎実験の結果を示す．ここでは投射面全体の面積に対する接触面の面積比 $p = S_0/S$ を 0.4~1 の範囲で設定した．反射波の振幅は $p = 0.6$ のときに最小で，遅延材全面を接触させたときの 0.3 倍である．振幅の低減が接触面積の減少を上回っていることから，提案手法の原理が実現されており，開放側からの反射波が接触側からの反射波の一部を打ち消しているとわかる．また，振幅が最小となった $p = 0.6$ の条件は前章で示した理想的な接触状態における面積比とほぼ同じである．ただし，遅延材と対象物の間に接触媒質があるため，接触側からの反射波は完全には打ち消されていない．

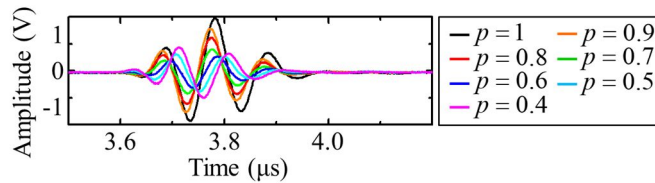


図 6 Reflected pulses from the healthy surface.

図 7 に高感度化実験の結果を示す．図 7(a)は時系列波形，同図(b)はその瞬時振動数である．実線は正常部，破線は欠陥部での結果を示している．また，遅延材全面を接触させた $p = 1$ の場合の結果と，基礎実験で表面からの反射波を最も低減できた $p = 0.6$ の場合の結果を比較している．図 7(a)の波形においては，正常部，欠陥部ともに提案手法の方が振幅が小さく，提案手法によって表面からの反射波が打ち消されたことがわかる．また，提案手法では欠陥部の位相が正常部に比べてやや遅れている．ただし，振幅に大差はなく，位相差のみで異常を検出するのは難しい．

一方，図 7(b)の瞬時振動数では提案手法 ($p = 0.6$) において従来手法 ($p = 1$) より全体的に瞬時振動数が高く，かつ 3.7 μs 以降で正常部と欠陥部の差が開いている．このように，正常部と欠陥部の違いが提案手法で拡大されたため，提案手法による高感度化が実現されたと言える．

(2) 数値シミュレーションを用いた考察

接触媒質の厚さを 10 μm，欠陥の深さを高感度化実験と同じ 50 μm に設定した場合の数値シミュレーションの結果を図 8 に示す．ここでは遅延材全面を接触させた $p = 1$ の場合と，提案手法を用いた $p = 0.6$ の場合のシミュレーション結果を比較している．図 8(a)の波形は実験結果である図 7(a)に近い振幅を示しており，従来手法と提案手法の振幅の違いも再現されている．

図 8(b)の瞬時振動数では 3.7 μs 付近の極大値の時刻が図 7(b)とほぼ同じであり，従来手法より提案手法の方が瞬時振動数が高い．波形に十分な振幅がある 3.7~3.9 μs を見ると特に提案手法において欠陥部の瞬時振動数が正常部より低くなっており，この特徴も実験結果と定性的に一致する．

瞬時振動数の変化はパルス同士の干渉によることが知られており，特に同一時刻における二つのパルスの振幅が等しいときに大きく変動して極値を作る (文献). そこで欠陥部に提案手法を適用した場合の数値シミュレーションから $u_n(t)$ を個々に求めると図 9 が得られる． $u_1(t)$ ，

$u_4(t)$ は振幅が小さく、支配的なのは $u_2(t)$ と $u_3(t)$ である。 $u_2(t)$ と $u_3(t)$ は打ち消し合う。 $u_n(t)$ を欠陥に由来する $u_4(t)$ とそれ以外の $u_{1-3}(t)$ で分けた場合、提案手法では後者の振幅が小さくなって $u_4(t)$ の振幅に近づく。このため、欠陥に由来する $u_4(t)$ が加わった反射波の瞬時振動数は早い時刻から正常部と異なる変化を示す。

このことから、提案手法を用いると欠陥の影響が波形に現れない場合でも瞬時振動数に現れやすくなって検出感度が高まると考えられ、表面近傍の欠陥検出に有効であると言える。

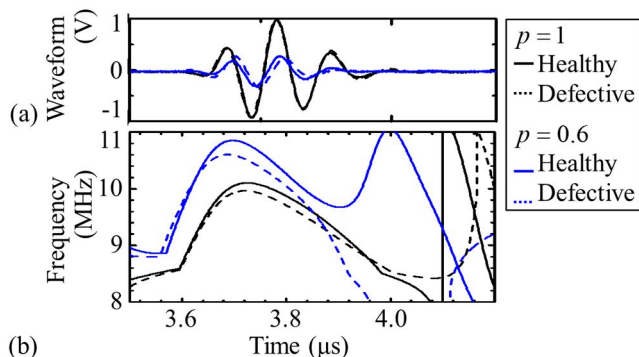


図 7 Comparison of the proposed method and the conventional method: (a) waveform, (b) instantaneous frequency.

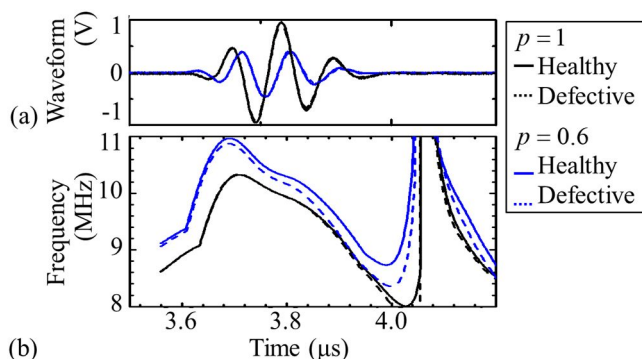


図 8 Simulation result of the proposed method and conventional method: (a) waveform, (b) instantaneous frequency.

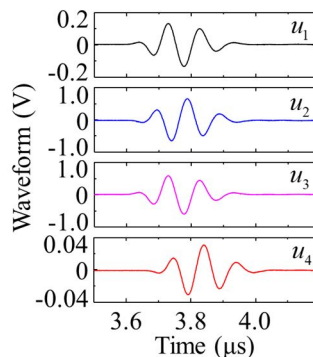


図 9 Simulated $u_n(t)$ in the case of an application of the proposed method to the block with a small defect.

(4) まとめと今後の課題

固体表面近傍の欠陥を超音波パルスで検査する際に障害となっていた表面由来の反射波を、機械的アナログ領域で低減する手法を提案した。提案手法を、基礎実験、高感度化実験、高感度化の数値シミュレーションを通して考究した結果、次の成果を得た。

提案手法により表面由来の反射波を機械的アナログ領域で相殺、低減した。接触媒質があるために完全な相殺は難しいが、より薄く介在できる接触媒質によって理想的な相殺に近づくと考えられる。

表面近傍の欠陥を検出するにあたり、欠陥が微小でその影響が受信波の波形に現れない場合でも瞬時振動数に欠陥の影響が現れ、それが提案手法によって明確化されることを示した。

提案手法を用いると表面由来の反射波の振幅が小さくなり、相対的に欠陥由来の反射波の振幅に近づくことがわかった。これにより瞬時振動数が変化し、高感度化が実現されていた。

今後の課題は、接触媒質の影響を最小化することのほか、対象物のエッジ部分でしか実現できていない提案手法を他の部分でも実現することである。

<引用文献>

井上 卓見, 中野 貴裕, 門脇 廉, 超音波パルスの瞬時振動数を用いた物体内部の接触境界面評価, 日本機械学会論文集, 81 巻, 832 号, 2015, 15-00420.

門脇 廉, 池田 翔輝, 井上 卓見, 反射超音波パルスを用いたボルトの緩み診断, 日本機械学会論文集, 85 巻, 871 号, 2019, 18-00202.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井林 洸一, 井上卓見, 門脇廉
2. 発表標題 超音波エコーの干渉を利用した物体表面近傍の異常診断
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 門脇廉, 王イ超, 井上卓見
2. 発表標題 機械的逆位相信号を用いた超音波異常診断の高感度化
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------