空中超音波１探触子反射法による非破壊検査の実用化に向けた装置系および信号処理手法の高度化

Improvement of inspection system and signal processing methods of air-coupled ultrasonic non-destructive inspection using single-probe reflection method for its practical applications

研究代表者　徳島大学 大学院社会産業理工学研究部　講師　石川 真志
Masashi Ishikawa

Nondestructive inspection using air-coupled ultrasonic has a great advantage in that it is a non-contact inspection method. However, its reflection method using single probe, which is commonly used in conventional ultrasonic inspection, is difficult to achieve because of the influence of extremely large reflection signals generated on the surface of the inspection object. In this study, in order to realize the air-coupled ultrasonic single-probe reflection method, the effective of exciting chirp signals and applying the pulse compression method was examined. Experimental results showed that the reflection signals after propagating in polystyrene specimens could be detected using the proposed method, and the thickness of the specimen could be detected by using periodicity of the observed multiple reflection signals.

要旨

空中超音波を用いた非破壊検査は対象物に対して非接触で検査が可能であるという大きな利点を有する一方で，検査対象物表面で生じる非常に大きな反射波の影響により，従来の超音波検査で一般的な１探触子での反射法による検査は困難とされている．本研究では空中超音波による１探触子反射法の実現を目指し，窓関数を乗じたチャープ波の励起やパルス圧縮等の信号処理の適用など，不要信号の低減と微小な欠陥信号の検出に効果的な送信時／受信時における各所の処理方法を検討し，その効果を検証した．提案手法による実験の結果，伝搬減衰の比較的小さな樹脂材料であれば内部反射信号の検出が可能であることが確認された．

１．　まえがき

超音波を用いた非破壊検査は，各種の検査技術の中でも最も一般的な手法である．一般的には検査対象物の表面に水やグリスなどのカプラントを介して超音波プローブを接触させ，対象物内部に超音波を励起する．あるいは，検査対象物そのものを水槽などに浸水させ，水中に設置したプローブより超音波を入射させる水浸法も広く用いられている．しかし，これらの方法は検査後に使用したカプラントや水分の除去作業が必要となることや，そもそも接触を嫌う対象物（高表面精度を有する，あるいは高温の対象物など）への検査は困難であるなど，実用上の課題も有する．これらに対する対処手段の一つとして，空中超音波による非接触検査が注目されている．空中超音波は，空気中へ励起した超音波を検査対象物へ入射させて検査を行う手法であり，試験体に対して非接触で検査を行うことができる．空中超音波に関する検査例としては，２つの探触子を対象物の両側に配置して検査を行う２探触子透過法(図 1(a))や，２探触子を検査対象物の同一面側に斜角配置して検査を行う２探触子斜角探傷法(V 透過法)(図 1(b))などが報告されている[1]~[4]．一方で，従来の超音波検査で広く用いられている１探触子による垂直反射法(図 1(c))は実現困難とされている．これは，超音波が空気中を伝搬した後に検査対象物に入射する際，空気と検査対象物間の大きな音響インピーダンス差によりそのエネルギーの大部分が検査対象物の表面で反射され，検査対象物内部に入射されるエネルギーがごくわずかとなるためである．さらに，信号検出に際しては，内部へ透過後に欠陥等で反射してプローブへ戻ってくる信号（欠陥信号）に対して，検査対象物表面で反射される信号（表面反射信号）が莫大であることから，欠陥信号が表面反射信号に覆い隠され，その検出が極めて困難となる．しかし，１探触子反射法はプローブを二つ使用する検査法と比較して単純な

装置構成で検査が可能であることに加え，欠陥信号の受信時間から欠陥深さの推定も可能であるなど，その実現に伴う利点は大きい．以上の背景から，本研究では空中超音波による一探触子反射法の実現を目指し，検討を行っている．過去の検討より，周波数変調を伴うチャープ波の励起と微弱な信号の検出が可能となるパルス圧縮技術を利用することで，空中から他の媒質へ入射した後の反射信号が検出可能であることが確認され，1探触子反射法による検査の実現可能性が示された[5][6]．本研究課題では，提案手法による非破壊検査の実用化を目指し，入射超音波の大振幅化が可能なプローブの検討と，その結果を踏まえた樹脂材料に対する検証実験を実施した．

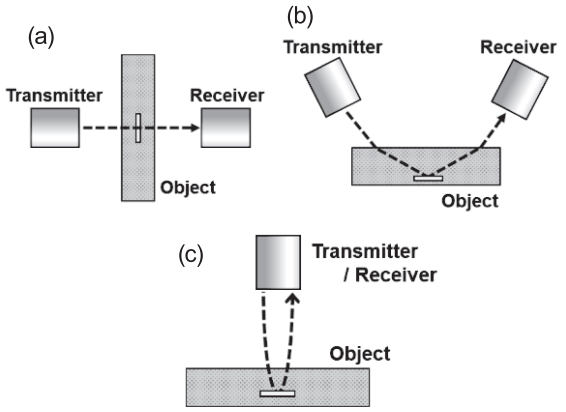

図１　空中超音波による検査法の模式図（(a) ２探触子透過法，(b) ２探触子斜角探傷法，(c)　１探触子垂直反射法

２．空中超音波１探触子反射法の実現のための信号処理手法

2.1　チャープ波の励起とパルス圧縮

チャープ波とは時間経過に伴い周波数が線形的に変化する波である．初期周波数 F_i，周波数帯域 B_w，励起時間幅 T の３つのパラメータによりチャープ波 $C(t)$ は以下の式で表すことができる．

$$C(t) = \sin\left(2\pi F_i t + \frac{\pi B_w}{T} t^2\right) \qquad (1)$$

ここで，t は時間であり，$0 \leqq t \leqq T$ である．本研究ではチャープ波を励起した後，受信信号に対してパルス圧縮による信号処理を行う．図２にパルス圧縮適用前後の波形例を示す．パルス圧縮は検出波形を参照波形で相関処理するものであり，ノイズや不要な信号に埋没した特徴的な信号を抽出するのに適した信号処理である．特にチャープ波と合わせて用いることで時間分解能が大きく向上することが知られている[7]．

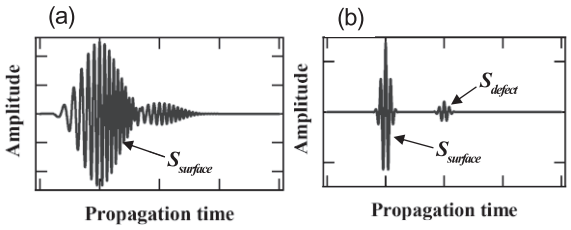

図２　チャープ波励起時の受信波形例，(a) パルス圧縮適用前，(b) パルス縮適用後（図中の $S_{surface}$ および S_{defect} はそれぞれ表面反射信号および欠陥反射信号を示す）

2.2　窓関数の選定

本研究では，チャープ波に窓関数を掛け合わせた波形を励起し，パルス圧縮適用後の波形に見られるサイドローブの低減を行った．過去の検討において，サイン窓やハニング窓，ブラックマン窓などの効果について検討を行い，特に Cos^4 窓（式(2)[8]）の適用が本検討においては有効であることが確認されている[5]．チャープ波に Cos^4 窓を掛け合わせた波形を図３に示す．以下では Cos^4 窓を利用した実験を示す．

$$W_c(t) = \cos^4\left(\frac{\pi t}{T}\right) \qquad (2)$$

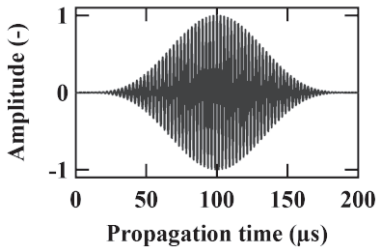

図３　Cos^4 窓を掛けたチャープ波形

３．樹脂材料に対する実験

3.1　ポリスチレン内部伝搬後の反射信号の検出

3.1.1　実験方法

１探触子反射法により固体材料内部を伝搬後の反射信号の検出可否を検証するため，ポリスチレン樹脂を対象物とした実験を行った．実験配置図を図４に示す．実験では，空中よりポリスチレンへ超音波を入射させ，内部伝搬後に底面で反射した信号を１探触子反射法で検出可能かどうか検証した．ポリスチレン樹脂試験片の厚さは 50，90 および 105 ㎜の３

種類を使用した．超音波プローブには中心周波数400 kHz のセンササイズ 25×25 mm の空中超音波プローブ（ジャパンプローブ株式会社，0.4K25×25N-TX）を使用し，プローブ－ポリスチレン間の距離は75 mm とした．励起超音波は $\cos^4$ 窓を乗算した周波数帯域200 kHz のチャープ波とした．励起された超音波は試験片の表面及び底面でそれぞれ反射し（それぞれ $S_{surface}$，S_{bottom} とする），各反射信号を同センサで受信した．

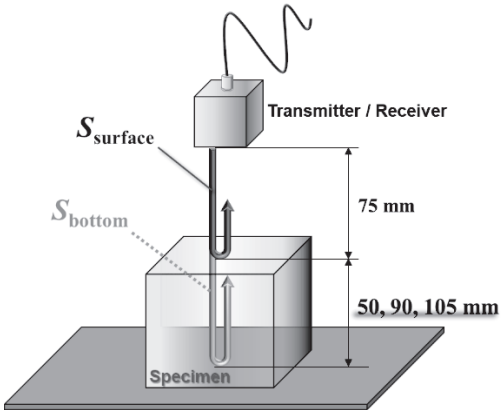

図４　ポリスチレン樹脂に対する１探触子反射法実験の概略図

3.1.2　実験結果

図５に各厚さのポリスチレン試験片への実験より得られた検出波形を示す．図５(a)はパルス圧縮前の波形を，図５(b)は図５(a)波形に対して試験片表面での反射波形を参照信号としたパルス圧縮を適用した後の波形を示す．パルス圧縮適用前の波形（図５(a)）ではノイズの影響で底面反射信号 S_{bottom} の検出は困難であるが，パルス圧縮適用後（図５(b)）ではノイズが大きく低減され，S_{bottom} の検出が可能となる様子が確認できる．図５(b)中には，ポリスチレン厚さと超音波の伝搬音速より S_{bottom} の検出が予想される時間を破線で示した（本計算では，ポリスチレン中の超音波伝搬音速を2290 m/s とした）．これより，厚さ90 および105 mm の試験片では，第一の底面反射波（S_{bottom}）は表面反射波 $S_{surface}$ に埋もれて検出が困難であり，検出された信号は底面－表面間の多重反射信号（S_{bottom_II} および S_{bottom_III}）であることがわかる．また，厚さ50 mm の試験片については第４波以降の多重反射信号が検出されている．これらの信号は，ポリスチレンの厚さ変化に伴う検出時間の変化も確認できることから，間違いなく底面反射信号を検出したものであると言える．従って，これらの結果は提案手法により樹脂材料中の内部伝搬後反射信号が検出可能であることを示すものである．

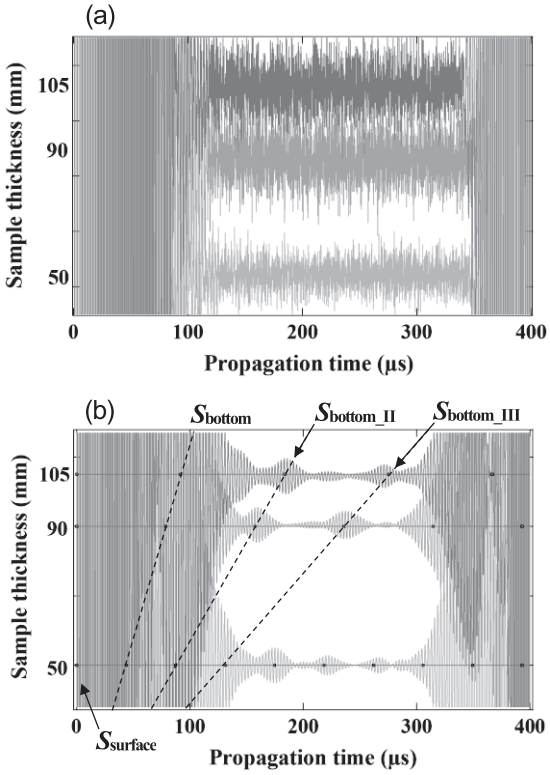

図５　各厚さのポリスチレン試験片への実験より得られた受信波形
(a)パルス圧縮適用前，(b) パルス圧縮適用後

3.2　多重反射信号の周期性を利用した板厚変化の検出

図５の結果より，１探触子反射法により多重反射後の複数の信号が検出可能であることが確認された．この多重反射信号の周期性を利用することで，検査対象物の厚さ変化の検出が期待できることから，その実験的な検証を行った．

3.2.1　実験方法

本実験の概略図を図６に示す．実験では 150×150×50 mm ポリスチレン試験片を用いた．本試験片は，部分的に試験片厚さが変化した領域を設けるため，中央に幅50 mm，深さ20 mm の溝が加工されている．実験では，溝加工を行っていない平面側に超音波プローブを配置し，超音波を入射させた（従って，超音波入射面から溝部上部までの板厚は30 mm となる）．

プローブと試験片との距離は 90 ㎜とした．プローブは試験片中央から左右に 60 ㎜，合計計 120 ㎜の距離を 2 ㎜ステップで直線的に移動させ，各位置での受信波形を取得した．実験に使用した超音波プローブ，および励起超音波の条件は３．１の実験と同様とした．

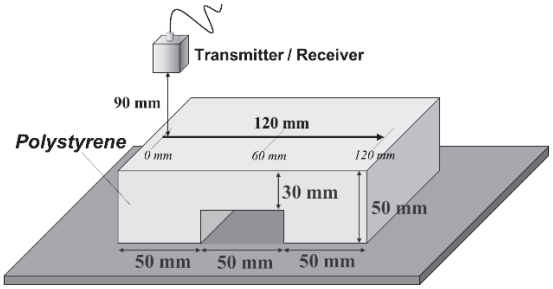

図６　部分的な板厚変化を有するポリスチレン試験片に対する実験の概略図

3.2.2　実験結果

図７に実験より得られた波形（パルス圧縮後波形）の例を示す（グラフ縦軸は左端での実験位置を０ ㎜とした際のプローブ設置位置を示す）．実験位置の変化に伴い受信波形の様子が変化しており，特に板厚が 30 ㎜となる中央（60 ㎜）位置では多重反射波の増加に伴う周期の短い多くの信号が見られる．この多重反射波信号の周期性をより明瞭に検出するため，得られた波形に対してフーリエ変換を行い，その周波数特性の評価を行った．図８に図７の波形に対してフーリエ変換を行った結果を示す．多重反射波の周期に相当する周波数スペクトルのピークが確認でき，そのピーク周波数は板厚変化に依存する様子が見られる．図９は各点での周波数スペクトルを２次元的にマッピングした結果であり，グラフ縦軸および横軸に周波数および実験位置（プローブ位置）を，色の濃淡で周波数スペクトルの強度を示す．ポリスチレン中の超音波伝搬音速を 2290 m/s とすると，厚さ 50 ㎜の板厚を厚さ方向に伝搬する際の多重反射波は周波数 22.9 kHz で，厚さ 30 ㎜では 38.2 kHz で周期的に検出されることが予想される．図９中にはこれらの周波数を図示したが，板厚が 30 ㎜となる中央（60 ㎜位置）付近において，38.2 kHz の信号が存在することが確認でき，これが中央部の厚さ変化を反映したものであると考えられる．本結果は，多重反射信号の周期性に注目することで，板厚変化の検出が可能であることを示すものであり，このことは厚さが既知である対象物中の欠陥検出にも応用可能であると期待される．なお，厚さ 30 ㎜と 50 ㎜の境界領域（40 ㎜や 80 ㎜位置など）においては，22.9 kHz および 38.2 kHz のいずれの周波数成分も顕著に検出されない領域が存在していた．これは，センササイズが 25 ㎜幅のプローブを使用したことから，位置によっては厚さ変化（段差）位置がプローブ領域内に入ってしまい，角部等での散乱等の発生も生じたことで，いずれの周波数成分も明瞭に検出できなくなったためであると考えられる．より高精度な計測のためには，プローブサイズの検討や焦点型センサの使用などが必要であると考えられる．

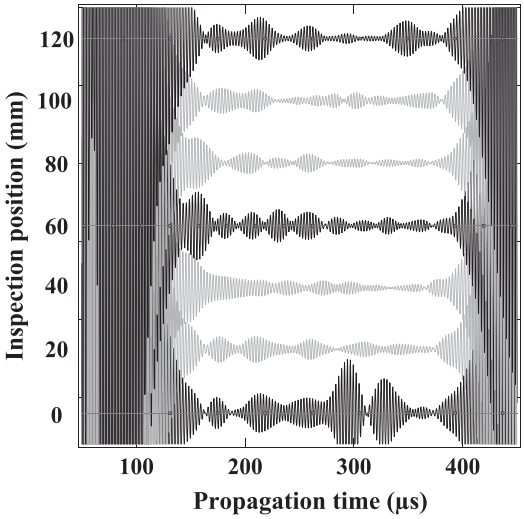

図７　実験で得られた各実験位置でのパルス圧縮後検出波形

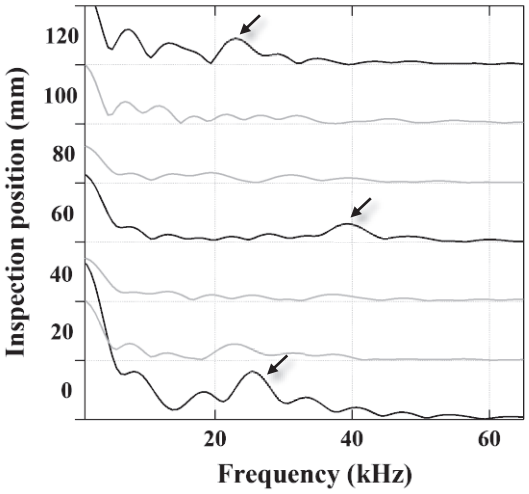

図８　図７の各波形に対するフーリエ変換により得られた各プローブ位置での周波数スペクトル

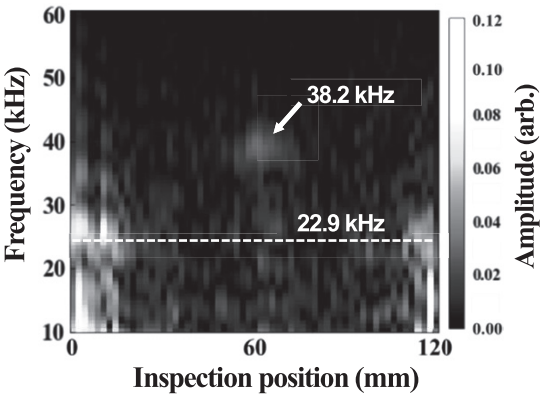

図９　各プローブ位置で得られた周波数スペクトルの２次元マッピング結果（縦軸および横軸に周波数および実験位置を，色の濃淡で周波数スペクトルの強度を示す）

3.3　アクリル内部伝搬後の反射信号の検出

ポリスチレンへの実験と同様にアクリル樹脂材料への実験も実施し，両者の比較を行った．本実験では厚さ 50 ㎜のアクリル試験片を使用した．実験で使用した超音波プローブ等の実験条件は３．１の実験と同様とした．図１０にアクリル試験片に対する実験結果とポリスチレンの結果を比較する．本図より，アクリルではポリスチレンのように底面反射波，およびその多重反射波を確認することは困難であった．これは，アクリルはポリスチレンと比較して減衰が大きいためであると考えられる．別途，接触型超音波プローブを使用した実験により各樹脂材料の伝搬減衰を計測したところ，ポリスチレンの減衰率が 0.50 dB/cm であったのに対し，アクリルの減衰率は 1.20 dB/cm であった．本結果は，比較的減衰の小さい材料であれば提案手法による内部反射信号の検出が可能であるものの，より高減衰の材料への適用に際しては検査感度の更なる改善が必要であることを示している．励起超音波の大振幅化や広帯域化が考えられる方法ではあるものの，これらは超音波の波形制御を困難にし，チャープ波形（窓関数を乗算後の波形）の劣化を引き起こす可能性がある．チャープ波形の劣化はパルス圧縮による効果（相関処理によるノイズやサイドローブの低減効果）を損なうこととなり，結果として検査感度の低下につながり得る．これらの問題の解決には，大振幅超音波を励起可能かつ高精度に波形制御が可能な超音波プローブの検討など，検査機器面の研究・開発が必要になると考えられる．

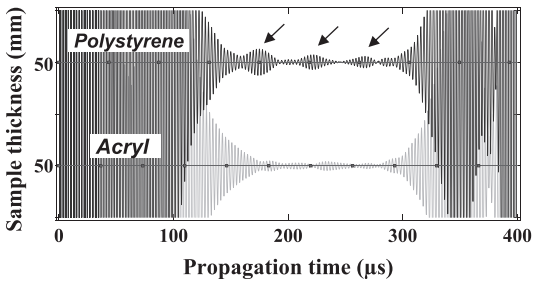

図１０　ポリスチレンおよびアクリル試験片に対する実験の比較（パルス圧縮後検出波形）

４．　フォーカスプローブ利用の試み

検査時の空間分解能を向上させ，かつより大エネルギーの超音波を検査対象物へ入射するための方法として点焦点型（フォーカス）プローブの利用が考えられる．このため，フォーカスプローブによるポリスチレン試験片への実験を行い，その効果を検証した．

実験では，フォーカスプローブ（ジャパンプローブ株式会社，0.4K20N-TX R40）を用いた．試験片には厚さ 105 ㎜のポリスチレンを用い，励起超音波の条件などのその他の実験条件は３．１と同様とした．実験で得られたパルス圧縮後の波形を図１１に示す．同試験片に対するフラットプローブによる実験結果（図５(b)中の 105 ㎜試験片に対する結果）と比較すると，フォーカスプローブを用いたことによる反射信号の顕著な検査感度の向上は見られず，むしろサイドローブの増加などにより信号の判別がやや困難となっている様子が確認できる．図１２に各プローブでの実験時に得られた表面反射信号の波形（パルス圧縮前）を示す．フォーカスプローブより励起された波形（図１２(a)）はフラットプローブ使用時（図１２(b)）と比較して励起波形の乱れ（窓関数適用後波形の形状劣化）が見られる．この励起波形の乱れのため，パルス圧縮処理時にサイドローブの低減効果が劣化したものと考えられる．このような波形の乱れはフォーカスプローブ－試験片間の距離の変化（焦点位置の設定）にも依存するため，$S_{surface}$ および S_{bottom} の２つの信号に対してパルス圧縮を行う本手法において，フォーカスプローブの使用は信号処理の面で困難が生じる．これらの結果より，本手法における安易なフォーカスプローブの使用は，かえって信号検出能力の劣化につながる可能性があり，信号検

出能力の更なる改善のためには，これらの点に考慮した新たなプローブ開発が望まれる．

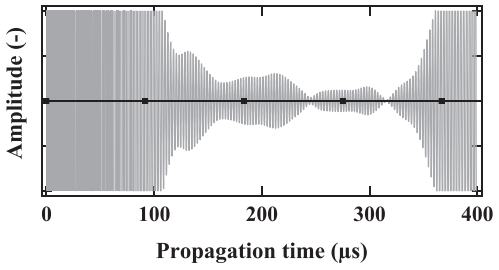

図１１　厚さ 105 ㎜のポリスチレン試験片に対するフォーカスプローブによる実験結果（図中のプロットは底面反射信号の検出が予想される時間を示す）

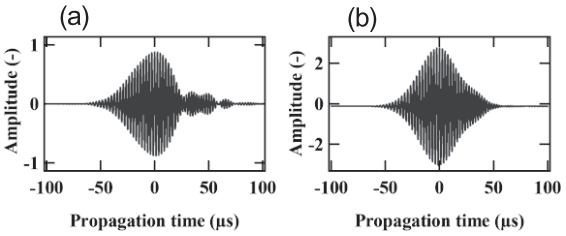

図１２　各種のプローブを使用した際に得られたパルス圧縮前表面反射波形，(a)フォーカスプローブ　(b)フラットプローブ

５．　おわりに

空中超音波による一探触子反射法の実現を目指し，チャープ波の励起とパルス圧縮技術を利用した検査法を提案し，その効果を樹脂材料への実験により検証した．ポリスチレン樹脂への実験の結果，材料内部を伝搬後の反射信号の検出が可能であることが確認され，また多重反射信号の周期性を利用することで対象物の板厚変化の様子も検出可能となる可能性が示された．その一方で，ポリスチレン樹脂よりも減衰率の大きなアクリル樹脂に対する実験では内部透過後の反射信号の検出は困難であった．アクリル樹脂などのより高減衰材料への適用を可能にし，提案手法による様々な対象物への検査を実現するためには，励起超音波のさらなる大振幅化や広帯域化が求められるが，既存の超音波プローブによる無理な大振幅化／広帯域化は超音波波形の形状劣化を引き起こし，これによりパルス圧縮の効果が損なわれる恐れもある．本手法の適用範囲の拡大，および実用化のためには，励起超音波波形を高精度に制御しつつ，かつ大振幅／広帯域化の超音波励起を可能にする新たな空中超音波プローブの開発が求められる．

口頭発表、受賞等

[1] 山田遼，石川真志，西野秀郎，空中超音波一探触子反射法による樹脂材料の内部検査に向けた実験的検討，日本非破壊検査協会 第 29 回超音波による非破壊評価シンポジウム (2022/1)，p.57-58.

[2] 山田遼，日本非破壊検査協会 第 29 回超音波による非破壊評価シンポジウム 新進賞 (2022/2)，発表題目：空中超音波一探触子反射法による樹脂材料の内部検査に向けた実験的検討

参考文献

[1] M. Castaings, P. Cawley, R. Farlow, and G. Hayward, Single sided inspection of composite materials using air coupled ultrasound, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.17, No.1 (1998), p.37-45.

[2] W. M. D. Wright, and D. A. Hutchins, Air-coupled ultrasonic testing of metals using broadband pulses in through-transmission, Ultrasonics, Vol.37, No.1 (1999), p.19-22.

[3] R. Stoessel, N. Krohn, K. Pfleiderer, and G. Busse, Acoustic non-linearity for defect selective imaging, Ultrasonics, Vol.40 (2002), p.633-637.

[4] Y. Fang, L. Lin, H. Feng, Z. Lu, and G. W. Emms, Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products, Computers and Electronics in Agriculture, Vol.137 (2017), p.79-87.

[5] K. Suzuki, M. Endo, M. Ishikawa, and H. Nishino, Air-coupled ultrasonic vertical reflection method using pulse compression and various window functions: feasibility study, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.58(SG) (2019), SGGB09.

[6] 石川真志，周波数変調信号と最適窓関数を利用した非接触 1 探触子空中超音波検査技術の開発，マツダ財団研究報告書，Vol.30 (2018)，p.138-143.

[7] T. H. Gan, D. A. Hutchins, D. R. Billson, and D. W. Schindel, The use of broadband acoustic transducers and pulse-compression techniques for air-coupled ultrasonic imaging, Ultrasonics, Vol.39, No.3 (2001), p.181-194.

[8] K. M. M. Prabhu, Window Functions and their Applications in Signal Processing, CRC press, New York (2013).