L-1

空中超音波フェーズドアレイを用いた高速非破壊検査システムの創出
Development of High-Speed Nondestructive Inspection System Using Airborne Ultrasonic Phased-Array

○大隅　歩[1]
*Ayumu Osumi[1]

Abstract : In recent years, non-contact nondestructive testing (NDT) methods utilizing airborne ultrasound have been actively studied in the field of ultrasonic inspection. To realize non-contact NDT, it is essential not only to achieve non-contact operation itself but also to visualize defects with accuracy comparable to that of conventional ultrasonic testing, while ensuring high-speed measurement. This paper presents the development of devices enabling non-contact NDT using airborne ultrasound, techniques for enhancing defect imaging accuracy, and a high-speed nondestructive inspection system employing an airborne ultrasonic phased array.

１．はじめに

我が国の社会インフラは，1960 年代の高度経済成長期にその多くが整備されたが，これらの社会インフラは半世紀以上が経過し，老朽化が進んでいる．そのため，非破壊検査による定期点検の重要性は年を追うごとに増している．特に，発電所や工場，橋梁，トンネルなどの大型構造物は，社会活動の重要な基盤であるため，災害や経年劣化により破壊が起きると，人々の生活や経済活動に甚大な被害をもたらす．このような被害を未然に防ぐために，定期的な非破壊検査による対象の状態把握が義務付けられている．これまでに非破壊検査のための試験として，X 線試験，浸透探傷試験，磁粉探傷試験，渦流探傷試験，超音波探傷試験等の種々の検査手法・技術が開発され，発展してきた．実際の非破壊検査では，それぞれの試験法の特徴を活かして検査対象ごとに異なる手法が適用される．中でも，超音波探傷試験は安全性や利便性に優れ，定量的な検査を実現する方法として広く用いられてきた．

超音波探傷試験で，最も一般的に用いられるのはパルスエコー法である．この方法は対象の内部に超音波パルスを入射させ，対象内部の欠陥部における反射波を受信し，欠陥位置を推定する方法である．

ところで，超音波探傷試験を行う場合には，超音波探触子を検査対象の表面にカップリング材（水・グリセリンなど）を介して接触させて行う．このカップリング材は，検査前に検査対象となる範囲に塗布し，検査終了後に拭き取る必要がある．この作業は検査の効率化の妨げとなり，検査作業の長時間化の一因となっている．さらに，対象物表面の凹凸が著しい場合は，カップリング材を用いても超音波を対象内に良好に入射させることができなくなる．そのため，超音波探傷の分野では，空中超音波を利用した非接触非破壊検査[1]が研究されてきた．非接触非破壊検査を実現するにあたって重要なことは，非接触であることはもちろんのこと，従来の超音波探傷と比較しても遜色のない精度で欠陥を映像化するとともに，計測の高速性を実現する必要がある．

本文では，著者がこれまでに行ってきた空中超音波による非接触非破壊検査を可能とするデバイスの開発，欠陥映像の高精度化，そして，高速化を実現した空中超音波フェーズドアレイを用いた高速非破壊検査システムについて紹介する．

２．非接触非破壊検査を実現するデバイス

空中超音波を利用した非接触非破壊検査で最も重要となるのが強力な空中超音波の放射である．これは，空気と固体の間の音響インピーダンスの差が非常に大きく，強力な空中超音波を用いない場合，固体内に超音波がほとんど透過しないためである．したがって，空中超音波を利用して非接触非破壊検査を行うには，極めて強力な空中超音波を発生させるデバイスの開発が不可欠である．

強力な空中超音波を発生させる主な手段としては，大振幅の音波を発生させること・デバイスからの音波放射面積をできるだけ大きくすること・放射した音波を集束させることが挙げられる．

著者らの研究グループでは，独自の技術を用いていくつかの空中超音波デバイス[2]を開発した．開発したデバイスは，音波を集束させる方式を用いており，駆動周波数は数 10kHz であるが，音波集束位置において，数 kPa～数 10kPa に達するほどの極めて高い音圧の空中超音波が放射可能である．大気圧が 101.3kPa であることを踏まえると，これらのデバイスからの放射音波は相当な音圧に達している．

1：日大理工・教員・電気

著者らは，上記の開発した空中超音波デバイスを用いて，非接触非破壊検査システムを構築し，固体内の欠陥[3,4]の映像化を実現した．

３．欠陥映像の高精度化

ここまでに開発したデバイスにより非破壊検査の非接触化は実現したが，実用するには従来の超音波探傷と同程度の精度で欠陥映像を得るために高精度化を行う必要がある．

高精度化を目指すにあたり，強力な音波を放射したときに発生する非線形音響現象[5]に着目した．非線形音響現象は，気体・液体・固体の媒質を問わず発生し，伝搬するに伴い波形が鋸波状に歪む現象である．この波形歪みが持つ高調波成分を利用することで，送信波の整数倍の周波数成分を利用できる．

著者らは，非線形音響現象によって発生した数10kHz～数100kHzまでの高調波成分を利用して，欠陥映像の水平方向分解能を大きく向上させ，高精度化を実現した[6,7]．

４．空中超音波フェーズドアレイによる検査の高速化

前節までの検討で，非接触化・高精度化は実現した．一方で，検査現場においては計測の長時間化が課題であるため，高速化は不可欠である．著者らは前節で述べたデバイスの長所である高精度化はそのままに計測を高速化する方法を模索した．従来の方法では，対象内の欠陥を映像化するために音波集束位置を機械的に走査する方式[8]を取っていたが，この方法では計測時間に長時間を要する．そこで，発想を転換し，電子的に音波集束位置を高速で走査する方式を提案した．この方法を実現するためのデバイスが空中超音波フェーズドアレイである．

著者らは，空中超音波フェーズドアレイをこれまでに開発した非破壊検査システムに搭載し，非破壊検査を行った結果，前節までの非破壊検査システムの計測時間を大幅に短縮し，高速化を実現した[9]．

５．まとめ

空中超音波による非接触非破壊検査を可能とするデバイスの開発，欠陥映像の高精度化，高速化を実現した空中超音波フェーズドアレイを用いた高速非破壊検査システムについて紹介した．

今後は，更なる高速化を図り，リアルタイム計測の実現を目指して研究を進めていく．

６．謝辞

日頃よりご指導いただいております伊藤洋一名誉教授，電気工学科の先生方および理工学部の先生方に感謝申し上げます．また，本研究に協力してくれました研究室の卒業生ならびに在校生に感謝いたします．

本研究成果の一部は，JSPS 科研費 25870784，15H05530，19K04931，22K04624 の援助を受けて行われた．

７．参考文献

[1] D.E. Chimenti: Review of air-coupled ultrasonic materials characterization, Ultrasonics, 54, pp.1804-1816, 2014.

[2] 伊藤洋一：強力空中超音波の発生方法とその応用技術, 電子情報通信学会 Fundamental Review, Vol.9, No.3, pp.205-213, 2016.

[3] Ayumu Osumi, Kazuki Doi, and Youichi Ito, Fundamental study of detecting internal defect in building materials using high-intensity aerial ultrasonic waves with finite amplitude, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.50, 07HE30, 2011.

[4] Ayumu Osumi, Hiromasa Kobayashi and Youichi Ito, Basic Study of Detecting Defects in Solid Materials Using High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.51, 07GE04, 2012.

[5] 鎌倉友男：非線形音響-基礎と応用-, コロナ社, 2014.

[6] 大隅歩，伊藤洋一，佐藤正己，梅村靖弘, 強力空中超音波と光学機器を用いたモルタル内欠陥の非接触破壊検査の基礎検討，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.5, 183-190, 2015.

[7] Ayumu Osumi, Masashi Ogita, Kazuya Okitsu, and Youichi Ito, Detection of crack in a shallow layer of mortar by using a harmonic component of very high intensity aerial ultrasonic waves, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.56, 07JC12, 2017.

[8] Ayumu Osumi, Kenta Yamada, and Youichi Ito, Imaging slit in metal plate using aerial ultrasound source scanning and nonlinear harmonic method, Acoustical Science and Technology, Vol.41, No.6, pp.885-890, 2020.

[9] Kyosuke Shimizu, Ayumu Osumi, and Youichi Ito, High-speed imaging of defects in thin plate by scanning elastic wave source technique using an airborne ultrasound phased array, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.59, SKKD15, 2020.