



Title	Ultrasonic phased array imaging with waveguide buffer
Author(s)	Xia, Mingqian
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/103212
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (XIA MINGQIAN)

Title

Ultrasonic phased array imaging with waveguide buffer
(ウェーブガイドバッファを用いた超音波フェーズドアレイイメージング)

Abstract of Thesis

Maintenance and quality control are essential for ensuring the safety, performance, and longevity of industrial facilities and infrastructure. In sectors such as energy, aerospace, and transportation, components are often subjected to severe conditions including thermal stress, mechanical loads, and corrosion. These factors can lead to degradation mechanisms such as fatigue and stress corrosion cracking (SCC), especially in critical regions like heat affected zones (HAZs) near welds. To prevent structural failures and extend service life, nondestructive testing (NDT) techniques are widely used to detect defects without damaging the components. Among the available inspection techniques, ultrasonic phased array (PA) technology is widely employed in NDT. However, in high temperature environments such as nuclear power plants, direct contact between probes and test objects is often impractical. Buffer rods are typically used to transmit ultrasonic signals while protecting the probe from heat. However, conventional bulk buffer rods suffer from near field limit that degrade beamforming performance when used with PA probes. This thesis proposes an alternative solution using waveguide-based buffer designs, inspired by guided wave behavior in plates and cylinders. Focusing on pipelines that carry high temperature liquid sodium coolant, this study explores waveguide buffers that preserve effective PA inspection under high temperature conditions.

First, numerical analyses were conducted to investigate PA imaging using a stacked plate buffer. The buffer was designed based on the dispersion characteristics of the S0 mode in Lamb waves to maintain the performance of the phased array transducer. Initial simulations showed limitations in imaging quality due to multiple reflections at the buffer ends. The concept of the effective detecting region (EDR) for a PA probe with a stacked plate buffer was then established through theoretical derivation and validated by numerical simulations. Results confirmed agreement between theory and simulation, and further analyses demonstrated that increasing the buffer length extends the EDR.

Second, experimental investigations were conducted to evaluate the feasibility of PA imaging using a stacked plate buffer. A buffer was fabricated based on the S0 mode dispersion characteristics and tested in defect imaging experiments. The initial results showed high intensity spurious regions and blurred defect images. Subsequent numerical analysis indicated that these spurious images were caused by trailing waves generated in a plate. Theoretical and numerical studies demonstrated that increasing the plate width can remove these trailing waves. Experiments with wider plates confirmed that the spurious images were effectively removed, resulting in clearer defect images.

Finally, to further solve the problems of trailing waves in plates, a buffer consisting of a bundle of circular cylinders was developed. The design was determined by considering the dispersion characteristics of the longitudinal guided wave modes in circular cylinders and parameters of the PA probe. In experiments using the buffer consisting of a bundle of circular cylinders, defects were successfully imaged using two imaging algorithms as plane wave imaging and total focusing method even though with a relatively small signal-to-noise ratio. The influences of trailing waves happened in stacked plate buffer were successfully solved by a buffer consisting of a bundle of circular cylinders with small diameter.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (XIA MINGQIAN)		
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	林 高弘
	副査 教授	中谷 彰宏
副査 教授	中村 暢伴	

論文審査の結果の要旨

本論文は、構造物や製品の超音波非破壊検査において近年広く利用されるようになった超音波フェーズドアレイによる画像化技術に関し、高温や極低温の対象物であってもその画像化技術を使えるようにするため、フェーズドアレイプローブと対象物との間に挿入されるバッファ構造に関する研究である。

高温や極低温の対象物に直接超音波探触子を接触させると、その超音波探触子が壊れてしまうという問題があり、一般的には対象物と超音波探触子の間にバッファロッドと呼ばれる棒状構造が挿入される。これにより、そのバッファロッド内で温度を緩和しつつ、ロッドを通して超音波を対象物へ入射し、対象物内からの応答波形をロッドを通して受信することが可能となる。しかし、このバッファロッド法を超音波フェーズドアレイによる画像化技術に適用しようとすると、対象物までの距離が遠くなり、画像が正しく得られないという課題が現れる。これは、この画像化技術が超音波の近距離音場限界以上の距離では利用できないという性質によるものである。この課題に対し、学位申請者の研究グループでは、バッファを薄板状にすることで、薄板内を伝搬するラム波の伝搬特性により、バッファ距離が長くなても超音波フェーズドアレイを用いた画像化が可能であるということを数値計算シミュレーションによって提案している。本論文はその提案手法を実験的に検証するとともに、実験で現れた新たな課題に対する解決方法および新しいバッファ構造の提案を行っている。主な成果を要約すると以下の通りである。

1. 薄板構造を積み重ねたバッファ構造を利用し、超音波フェーズドアレイによる画像化が可能であることを実験的に示している。その際、薄板内を伝搬するラム波 S0 モードの特性を考慮し、薄板の厚みを決定する必要があることを明らかにしている。
2. バッファ内を往復する波の影響により、効果的に画像化できる範囲に制限があることを理論的および実験的に明らかにしている。
3. 薄板状バッファ構造を利用すると、側面からの反射による遅れ波 (trailing wave) が発生し、画像に影響を与えることを、超音波伝搬の数値計算シミュレーションによる明らかにしている。またその対策として遅れ波が画像に影響を与えないほど遅くに現れるように薄板バッファの横幅を大きくすることを提案し、実験的にもその効果を明らかにしている。
4. 薄板状バッファ構造に代わるバッファとして、細い丸棒を束ねたバッファ構造を新たに提案し、超音波フェーズドアレイによる画像化に適用可能であることを実験的に確認している。また、この丸棒の直径は丸棒内を伝搬するガイド波縦振動モードの伝搬特性を考慮することで決定できることを明らかにしている。

以上のように、本論文は、超音波フェーズドアレイによる画像化技術に関し、超音波フェーズドアレイプローブと対象物との間に挿入するバッファ構造を、その構造内の超音波 (ガイド波) 伝搬特性を考慮して設計し、実験的に利用可能であることを実証している。今後、新型の原子力発電所や種々のプラントなどで適用範囲の拡大が期待される高温や極低温の配管や炉構造物への利用が想定されるとともに、高温溶融金属のモニタリングや極低温流体の音速計測など広い波及効果も期待できる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。