

サブハーモニック超音波フェーズドアレイによる 閉じたき裂サイジング

Sizing of Closed Cracks Using Subharmonic Phased Array

東北大学	小原 良和	Yoshikazu OHARA
東北大学	菅原 あずさ	Azusa SUGAWARA
東北大学	山中 一司	Kazushi YAMANAKA
東北大学	三原 毅	Tsuyoshi MIHARA

Closed cracks can cause the underestimation or overlook by conventional (linear) ultrasonic method, because the ultrasound is transmitted through closed cracks. To solve this problem, we have developed an imaging method, subharmonic phased array for crack evaluation (SPACE), based on subharmonic generation by large-amplitude short-burst-wave input and phased-array imaging algorithm with frequency filtering. Thus far, we have demonstrated in the crack depth measurement in closed fatigue cracks and stress corrosion cracks (SCCs). In this study, some of the results we have obtained by SPACE are introduced as typical examples, where fundamental array (FA) images corresponding to the conventional linear ultrasonic images caused the underestimation of closed-crack depth, whereas subharmonic array (SA) images achieved the improvement in the accuracy of closed crack depth sizing.

Keywords: Nondestructive testing, Crack depth sizing, closed cracks, Subharmonic waves, Phased-array imaging

1. はじめに

発電プラントでは供用期間増大に伴い疲労き裂や応力腐食割れ (stress corrosion crack: SCC) が発生するが、安全な運転には、これらを定期検査時に非破壊で高精度サイジングすることが肝要である。特に、最重要なき裂深さのサイジングは、原理的に超音波でのみ可能であるため、広く用いられてきた。超音波を用いると、空隙を伴うき裂 (開いたき裂) では、母材・空気間の音響インピーダンスの差により、き裂端部や根元で反射・散乱するため、検出・サイジングが可能である。しかし、圧縮残留応力やき裂面間の酸化物生成により閉じたき裂では、超音波が透過するため、過小評価や見逃しを引き起こす。

この解決法として、超音波と界面 (き裂などの欠陥) の非線形相互作用を利用した方法 (非線形超音波) が注目を集めている。これは、大振幅超音波 (周波数 f) の引張応力でき裂開口部を一時的に開かせ、開閉振動させ

ることで、その部位で発生する高調波 ($2f$ 、 $3f$ 、 \dots) やサブハーモニック波 ($f/2$ 、 $f/3$ 、 \dots) を用いる。特に、サブハーモニック波は閉じたき裂でのみ発生するため、選択性に優れ、時間分解能も高い [1,2]。

この知見に基づき、我々は閉じたき裂深さをサイジング可能な映像法 SPACE (subharmonic phased array for crack evaluation) を開発 [3-6] し、その有効性を示してきた。本報では、その適用例について報告する。

2. 閉じたき裂の映像法 SPACE

閉じたき裂の深さサイジングのための映像法 SPACE の概念図を図 1 に示す [3,4]。送信側探触子 (LiNbO₃/LN 振動子により試作) により大振幅超音波を入射することで、き裂の開口部では基本波 (周波数 f) の線形散乱が起り、閉口部では開閉振動により分調波 (周波数 $f/2$) が発生する。これをアレイ探触子で受信し、デジタルフィルタで各成分を分離後、遅延則に従いシフト加算する。これにより、基本波 (fundamental array: FA) 像およびサブハーモニック波 (subharmonic array: SA) 像を得る。これにより、開いたき裂と閉じたき裂が映像化できる。

連絡先: 小原良和、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02、東北大学大学院工学研究科
E-mail: ohara@material.tohoku.ac.jp

このように、送受信別の探触子を用いる方式をLN SPACEと呼ぶ。一方、送受信に同一のアレイ探触子を用いる方式（単一アレイ SPACE）も開発してきた[5,6]。単一アレイ SPACEでは、遅延則に従い大電圧のバースト波で各素子を励振することで、集束効果により入射波の大振幅化を実現する。特に、アレイ探触子単体を設置すれば良いだけのため、シンプルであり、狭い検査面への適用性にも優れる。

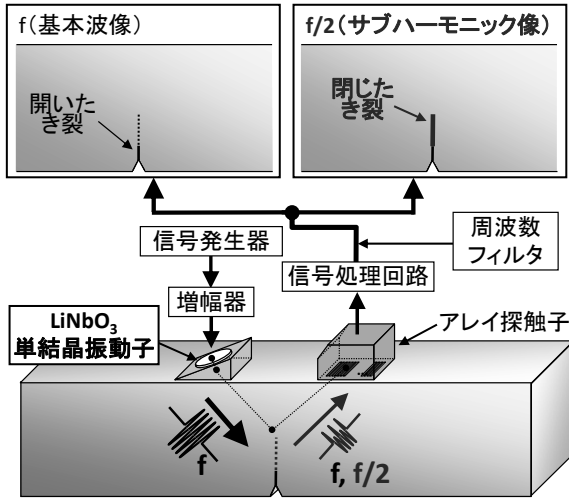


図1 閉じたき裂の映像法 LN SPACE の概念図

3. 実験結果

LN SPACEの疲労き裂への適用例を示す[3,4]。模擬試験片として、アルミニウム合金 A7075 を選択し、3点曲げ疲労試験により、異なる疲労条件で2種類の深さ20 mmの疲労き裂を導入した。励振条件には、入射周波数7 MHz、サイクル数3を選択し、図2に示す条件で計測した。き裂が開く条件 ($K_{max}=5.3$, $K_{min}=0.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) で導入された疲労き裂では、FA像(図3(a))で端部が観察され、SA像(図3(b))で観察されなかった。これより、開いたき裂はFA像で映像化できることが確認された。一方、き裂が閉口する条件 ($K_{max}=4.3$, $K_{min}=0.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) で導入された疲労き裂では、FA像(図3(d))で観察されなかったき裂端部が、SA像(図3(e))で初めて明瞭に観察された。これより、SA像が閉じたき裂の映像化に有効であることが実証された。

次に、単一アレイ SPACEの原子炉部材への適用例を示す[5,6]。模擬試験片として、原子炉容器を想定して、粗大結晶粒を有するステンレス鋼 SUS304 の溶接熱影響部に、原子炉実機と同様の高温高圧水環境下 (288 °C) で SCC を導入した。励振条件には、入射周波数7 MHz、サ

イクル数3を選択し、図4に示す条件で計測した。その結果、FA像(図5(a))では、映像化範囲全体に渡って、多数の応答が観察されたが、SCCは映像化されなかった。これは、粗大結晶粒の多重散乱によると考えられる。一方、SA像(図5(b))では、点A、B、Cのように明瞭な輝点としてSCCが映像化された。これにより、き裂深さが19.5 mmと計測された。さらに、サブハーモニック波の発生を確認するため、点A、B、Cにおけるシフト加算波形を抽出し、時間・周波数解析(ウェーブレット変換)を行った(図6)。その結果、粗大結晶粒からの線形散乱の応答(7 MHz)は全体に渡って観察されたのに対し、サブハーモニック波(3.5 MHz)は音速と幾何学的関係から計算された映像化用時間範囲でのみ、基本波とは分離して観察された。これにより、閉じたき裂でのサブハーモニック波の発生が確認された。以上より、粗大結晶粒を有する難検査材料のSCCに対しても、SPACEが有効であることが実証された。

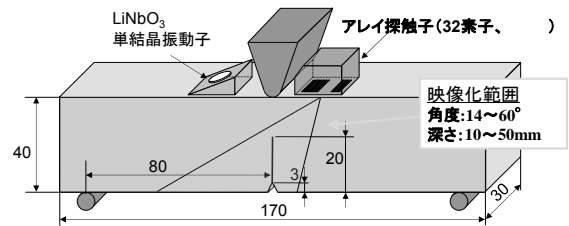


図2 LN SPACEの測定条件

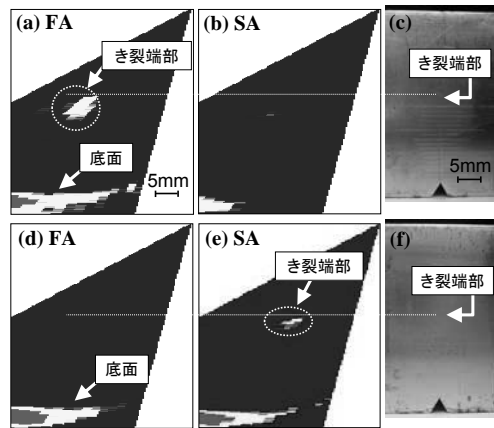


図3 LN SPACEによる疲労き裂の映像化結果：
(a-c) 開いたき裂、(d-f) 閉じたき裂

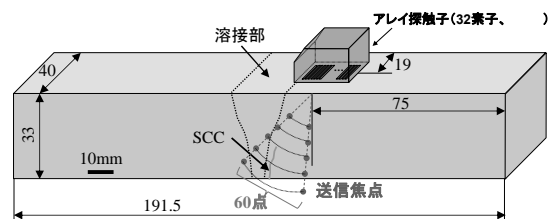


図4 単一アレイ SPACEの測定条件

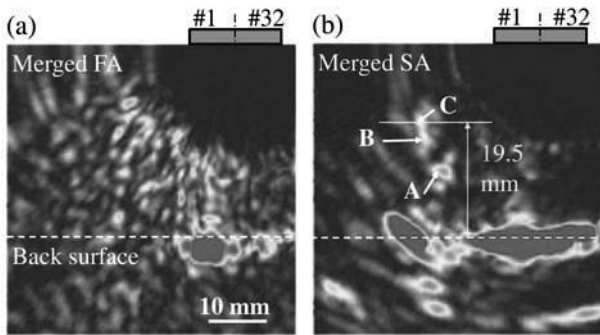


図5 単一アレイ SPACE による SCC の映像化結果

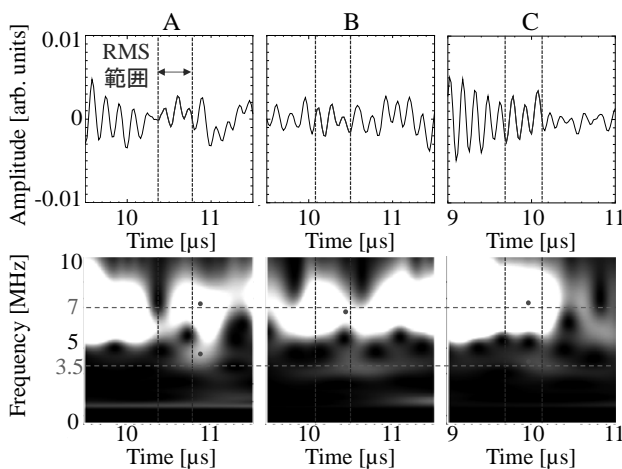


図6 SA 像の応答 (図5(b)の点A、B、C) のシフト加算波形とウェーブレット変換結果

4. おわりに

閉じたき裂の深さサイジングのため、サブハーモニック波とフェーズドアレイを組み合わせた閉じたき裂の映像法 SPACE を開発し、閉じた疲労き裂や SCC でその有効性を実証した。

現在、き裂の更なる高選択性映像化を実現するため、更なる大振幅超音波入射のため、SPACE の送信探触子を高度化[7]するとともに、熱応力を用いた簡易的な閉じたき裂の映像法[8]も開発している。また、き裂長さの計測法として、表面波を用いたフェーズドアレイ映像法[9]の開発にも取り組んでいる。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤 B : 15H014139、挑戦的萌芽 : 26630340) の補助により

行われた。

参考文献

- [1] K. Yamanaka, T. Mihara, and T. Tsuji, "Evaluation of closed cracks by model analysis of subharmonic ultrasound", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, 2004, pp.3082-3087.
- [2] Y. Ohara, T. Mihara, and K. Yamanaka, "Effect of adhesion force between crack planes on subharmonic and DC responses in nonlinear ultrasound", Ultrasonics, Vol.44, 2006, pp.194-199.
- [3] Y. Ohara, T. Mihara, R. Sasaki, T. Ogata, S. Yamamoto, Y. Kishimoto, and K. Yamanaka, "Imaging of closed cracks using nonlinear response of elastic waves at subharmonic frequency", Applied Physics Letters, Vol.90, 2007, pp.011902-1-3.
- [4] Y. Ohara, S. Yamamoto, T. Mihara, and K. Yamanaka, "Ultrasonic evaluation of closed cracks using subharmonic phased array", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.47, No.5, 2008, pp.3908-3915.
- [5] 小原良和、堀之内聡、新宅洋平、柴崎亮、山口雄一、田上稔、山中一司、"単一アレイのサブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE の開発とステンレス鋼溶接部の閉じた応力腐食割れの高選択性映像化"、非破壊検査、Vol.60、No.11、2011、pp.658-664.
- [6] A. Sugawara, K. Jinno, Y. Ohara, and K. Yamanaka, "Closed-crack imaging and scattering behavior analysis using confocal subharmonic phased array", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.54, 2015, pp.07HC08-1-8.
- [7] T. Mihara, G. Konishi, Y. Miura, and H. Ishida, "Accurate sizing of closed crack using nonlinear ultrasound of SPACE with high voltage transformer", Vol.1581, No.727, 2014, pp.727-732.
- [8] Y. Ohara, K. Takahashi, S. Murai, and K. Yamanaka, "High-selectivity imaging of closed cracks using elastic waves with thermal stress induced by global preheating and local cooling", Vol.103, 2013, pp.031917-1-5.
- [9] A. Ouchi, A. Sugawara, Y. Ohara, and K. Yamanaka, "Subharmonic phased array for crack evaluation using surface acoustic wave", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.54, 2015, pp.07HC05-1-6.