

閉じたき裂の高精度計測のための 非線形超音波映像法の開発

小原良和*

1. はじめに

東日本大震災以後、安全・安心な社会の重要性が再認識されているが、構造物の安全性保障には高精度な非破壊評価法が必要である。き裂の計測には超音波が用いられているが、疲労き裂や応力腐食割れ(stress corrosion crack: SCC)は、圧縮残留応力⁽¹⁾やき裂面間の酸化膜生成⁽²⁾により、閉じることがある。この場合、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、固体内界面における超音波の非線形現象を利用した非線形超音波が注目されている。これは、大振幅超音波(周波数 f)の引張応力でき裂閉口部を開かせ、開閉振動を誘起することで、その部位で発生する高調波($2f, 3f, \dots$)⁽³⁾や分調(サブハーモニック)波($f/2, f/3, \dots$)⁽⁴⁾を用いる。しかし、高調波は閉じたき裂だけではなく、探触子、液体カップラントなどでも発生する。それゆえ、き裂閉口部からの応答のみを抽出することは容易ではない。これに対し、分調波は、閉じたき裂でのみ発生するため、選択性に優れる。

我々は、閉じたき裂の透過波形計測の実験と1次元減衰振動子モデルによる数値シミュレーションにより、分調波が高い選択性に加えて、優れた時間分解能を持つことを見出した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この知見に基づき、閉じたき裂深さを計測できる映像法(subharmonic phased array for crack evaluation: SPACE)を開発した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。SPACEは、分調波に限らず、き裂の非線形超音波計測における世界で初めてのフェーズドアレイ映像法である。これまで、閉じた疲労き裂⁽⁷⁾⁻⁽¹³⁾、SCC⁽²⁾⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾や材料製造プロセスで発生した閉じたき

裂⁽¹⁶⁾に適用し、有効性を実証してきた。さらに、最適映像化条件の抽出や界面の非線形現象解明に有用な減衰2重節点⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾の数値シミュレーション法の開発も進めてきた。また、閉じたき裂の更なる高選択性映像化を実現するため、異なる荷重における閉じたき裂の超音波フェーズドアレイ像の差分を取る荷重差分法(load difference phased array: LDPA)⁽¹⁹⁾と広域加熱・局所冷却(global preheating and local cooling: GPLC)⁽²⁰⁾による引張熱応力負荷方法の開発も行ってきた。

本稿では、航空機や発電プラントで特に問題となっている閉じた疲労き裂とSCCの映像化に焦点を絞り、最新の研究状況について概説する。

2. 閉じたき裂の映像法 SPACE

SPACEの概念図を図1に示す。送信側には、絶縁耐圧が高く、サイクル数が数個でも大振幅超音波を発生できるLiNbO₃探触子を試作した。受信側には深さ方向の映像化のためアレイ探触子を用いた。送信探触子により大振幅超音波を入射することで、き裂開口部では基本波の線形散乱が起こり、閉口部では分調波の非線形散乱が起こる。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、遅延則に従ってシフト加算することで、基本波(fundamental array: FA)像および分調波(subharmonic array: SA)像を得る。これより、FA像では過小評価してしまう閉じたき裂深さをSA像により正確に計測できる。

* 東北大学助教；大学院工学研究科材料システム工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02)

Development of Nonlinear Ultrasonic Imaging Method for Accurate Measurement of Closed Cracks; Yoshikazu Ohara (Department of Materials Processing, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai)

Keywords: ultrasonic nondestructive evaluation, nonlinear ultrasonic imaging method, closed cracks, crack depth measurement, subharmonic, thermal stress

2014年1月6日受理[doi:10.2320/materia.53.100]

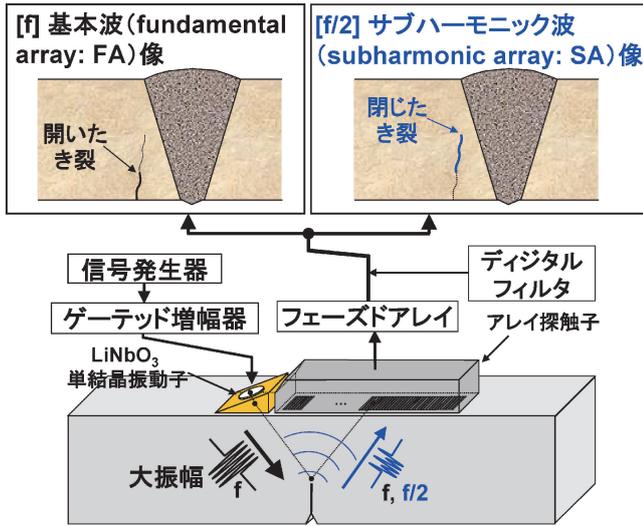


図1 SPACEの概念図.

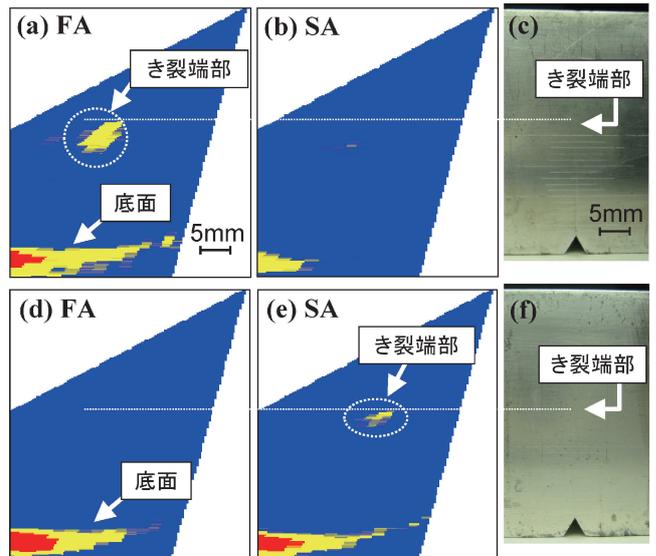


図2 疲労き裂(A7075)の映像化結果：開いたき裂および閉じたき裂の(a), (d)FA像, (b), (e)SA像, (c), (f)表面写真.

3. SPACEによる疲労き裂の映像化

アルミニウム合金 A7075の板に、3点曲げ疲労試験(異なる疲労条件で2種類)により、深さ 20 mm の疲労き裂を作製した。測定条件として、入射周波数 7 MHz, 変位振幅 17 nm_{p-p}, サイクル数 3 を選択した。開口条件 ($K_{max} = 5.3$, $K_{min} = 0.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) で導入された疲労き裂では、FA 像(図 2(a))で端部が観察され、SA 像(図 2(b))で観察されなかった。これより、開いたき裂と確認でき、開いたき裂には FA 像が適することが分かった。き裂深さは(図 2(c))の表面観察結果と一致した。一方、閉口条件 ($K_{max} = 4.3$, $K_{min} = 0.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) で導入された疲労き裂では、FA 像(図 2(d))で観察できなかった端部が SA 像(図 2(e))で明瞭に観察された。これより、閉じたき裂には、SA 像が有効であることが分かった。

次に、原子力発電所のシュラウドや再循環系配管に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の実機に近い厚さ (38 mm) の板を用い、3点曲げ疲労試験 ($K_{max} = 18.6$, $K_{min} = 0.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) により、深さ 9 mm の閉じたき裂を作製した。

このき裂に、 K が K_{max} を越えない静的荷重を段階的に負荷することで、き裂の閉口状態を変化させながら映像化した。ここで、入射周波数 7 MHz, 変位振幅 7 nm_{p-p}, サイクル数 3 を選択した。

静的荷重 2, 9, 12 kN (応力拡大係数 $K = 2.8, 12.6, 16.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を負荷した場合の FA 像と SA 像を図 3 に示す。各荷重で様々な映像が得られたが、全ての荷重条件に置いて、FA 像ではき裂深さを過小評価してしまったが、SA 像では、強く閉じたき裂に対しても、正確なき裂深さが得られることが分かった。これは、SPACE が閉じたき裂の高精度計測に有効であることを示す。また、 $K = 16.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ のとき、SA 像(h)では A が観察された。これは、 $K = 14.9$

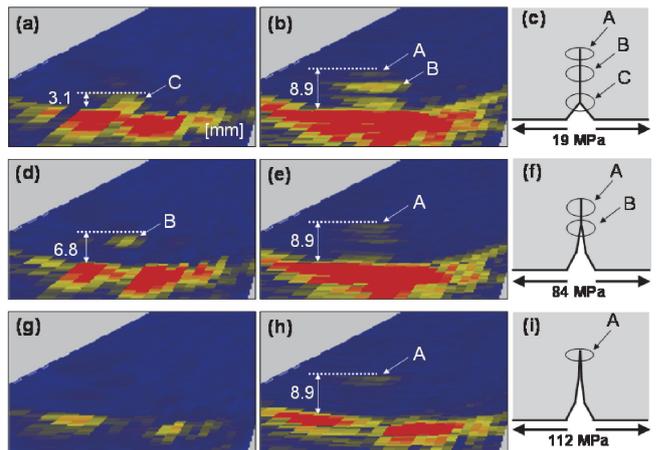


図3 疲労き裂(SUS316L)の映像の荷重依存性：応力拡大係数 $K = 2.8, 12.6, 16.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ における(a), (d), (g)FA像, (b), (e), (h)SA像, (c), (f), (i)き裂模式図.

$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (曲げ応力では 100 MPa に相当) でも、A が閉口していたことを示唆している。以上より、SPACE により、荷重変化に伴うき裂各部位の開閉状態も映像化できることも分かった。

4. SPACEによるSCCの映像化

原子炉実機と同様の SCC を模擬するため、鋭敏化ステンレス鋼 SUS304 溶接試験片の熱影響部に、高温高圧水環境 (288°C) 中で残留応力により SCC を導入した。本実験では、送受信同一の PZT アレイ探触子 (32 素子, 0.5 mm ピッチ) を用いる単一アレイ SPACE⁽¹⁵⁾ を用いた。ここで、入射周波数 7 MHz, 入力電圧 150 V, サイクル数 3 を選択した。

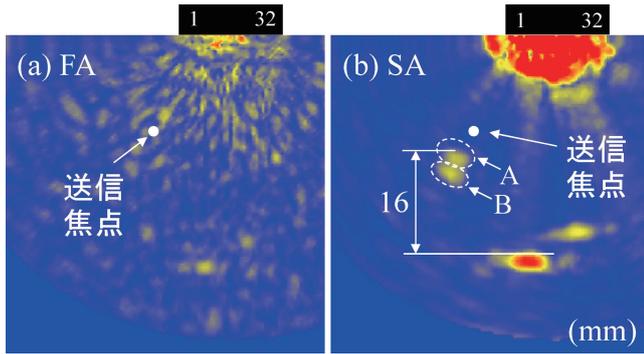


図4 SCCの映像化結果：(a)FA像，(b)SA像。

映像化結果を図4に示す。FA像では多数の線形散乱によりSCCは映像化されなかった。これは、粗大結晶粒界での線形散乱によると考えられる。一方、SA像では少数の明瞭な輝点(点A、B)としてSCCが映像化された。これらは、高温高圧水での酸化膜生成によりSCCが閉じていたことを示唆している。以上より、粗大結晶粒を有する閉じたSCCの深さ計測にもSPACEが有効であることが実証された。

5. GPLCとLDPAによる閉じたき裂の高選択性映像化

SPACEは閉じたき裂深さの計測に有効であるが、高い時間分解能を得るために短いバースト波を使用したため、スペクトルの広がりにより、底面などの強い線形散乱源がSA像に現れることがあった。そこで、閉じたき裂の更なる高選択性映像化のためのGPLCとLDPAの概念図を図5に示す。まず、広域加熱(global preheating: GP)後・局所冷却(local cooling: LC)前の線形フェーズドアレイ(PA)像(図5(a))では、き裂開口部と底面、溶接欠陥が映像化されるが、閉じたき裂は映像化されない。そこで、冷却スプレーを試験片上面に噴射し急速に冷却すると、上面近傍が熱収縮する。これにより、3点曲げと同様の原理でき裂に引張熱応力が作用する。ここで、作用する引張熱応力は、試験片上面とき裂部の温度勾配に依存するため、GP温度を変えることで、その大きさを制御できる。これにより、閉じたき裂端部は開口し、PA像(図5(b))で映像化される。一方、その他の線形散乱源の応答は変化しない。それゆえ、LDPAにより、LC前後のPA像の差分像(図5(c))を取ることで、き裂以外の応答を除去し、閉じたき裂の応答変化のみを映像化できる。

本実験では、アルミニウム合金A7075のCT(compact tension)試験片の閉じた疲労き裂($K_{max} = 9.0$, $K_{min} = 0.6$ MPa \cdot m $^{1/2}$)を用いた(図6)。まず、真のき裂深さを調べるため、油圧制御試験機でき裂に機械的に引張応力を負荷し、PAで映像化した。その結果、11.3 mmであることが分かった。

熱応力を用いた実験では、GP温度50°Cを選択し、試験片底面からホットプレートで加熱した後、アクリル製の蓋で限

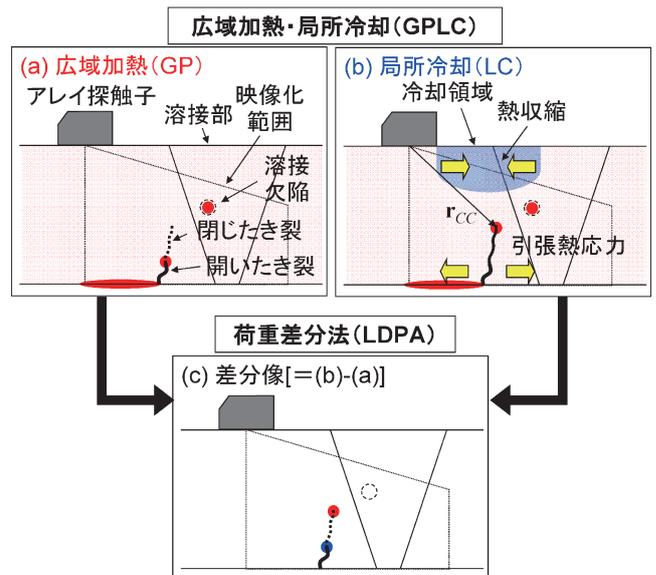


図5 GPLCとLDPAの概念図：(a)GP後・LC前のPA像，(b)LC後のPA像，(c)差分像[=(b)-(a)]。

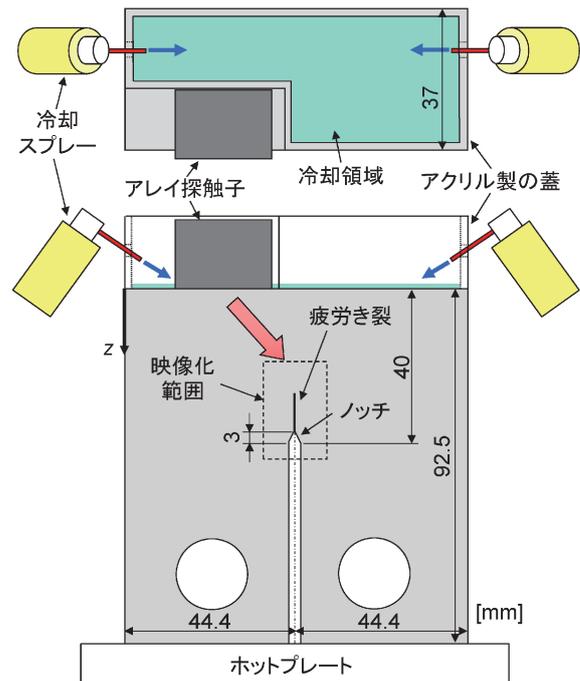


図6 GPLCの実験条件。

定された範囲を10 s間、2つの冷却スプレー(HFC-125a, -55°Cまで冷却可能)により左右から急速に局所冷却した。その過程を、PZTアレイ探触子(5 MHz, 32素子)と時間分解能の高いパルス(100 V)波を用いたPAで映像化した。

GPLCで得られたPA像の変化を図7に示す。GP後・LC前のPA像(図7(a))では、き裂は映像化されなかった。これは、無負荷ではき裂が閉じていたことを示唆している。一方、LC開始後のPA像(図7(b)-(d))では、き裂は明瞭に映

