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*

shinshinkiei

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, …)⁽³⁾や分調(サブハーモニック)波(f/2,f/3,…)⁽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,ディ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]



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 MPa·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 MPa·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 MPa·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 MPa·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 MPa·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 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.



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 MPa・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.

MPa・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℃)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·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℃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



PA 像, (b) LC 後の PA 像, (c) 差分像[=(b) -(a)].



定された範囲を10s間,2つの冷却スプレー(HFC-125a, -55℃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



図7 GPLCにより得られた PA 像とLDPA により得られた差分像. (a) GP 後・LC 前の PA 像, (b)-(e) LC 開始後 2 s, 4 s, 10 s, and 15 s の PA 像. (f) 差分像.

像化された. また,最大き裂深さは,LC開始後t=4sの PA像(図7(c))で11.3 mm だった. これは,実際のき裂深 さと一致することから,GPLCにより端部まで開口したと 考えられる. これより,GPLCが強く閉じたき裂の開口法 として有効であることが実証された.

次に、き裂応答のみを抽出するため、GP後・LC前のPA 像(図7(a))とGPLC適用後のPA像(図7(c))にLDPAを 適用した.その結果、差分像(図7(f))で、き裂の開閉に関 係しない線形散乱源(ノッチ左端)の除去と、き裂端部と根元 の応答変化の抽出に成功した.さらに、き裂端部と線形散乱 源(ノッチ左端)の強度比(I_c/I_l)として選択性を調べた.その 結果、LDPAにより45.6 dB向上した.これより、GPLC とLDPAの融合により、強く閉じたき裂の高選択性映像化 が実現できることが実証された.

6. おわりに

本報では、金属材料を対象として、SPACE による閉じた き裂の高精度深さ計測と、GPLC と LDPA による閉じたき 裂の高選択性映像化について述べた.

一方,高度経済成長期に建造されたインフラ設備の老朽化 問題が昨今顕在化しており,政府も「インフラ長寿命化基本 計画」において非破壊検査を重要推進項目に上げている.今 後,金属だけではなく,緊急性の高いコンクリート構造物の 検査法の開発も進めていく必要がある.

また,現在進行中の福島第一原発の廃炉には今後30~40 年かかると言われている.ここで,燃料デブリの形状・性状 の計測,ペデスタルの強度評価,サプレッションチェンバの 漏洩箇所特定等に対する超音波計測技術への期待も高い.こ れらに対し,これまで蓄積してきた学術・技術基盤を総結集 し,対象部位に最適な計測法へと発展させることで,廃炉の 工期短縮にも貢献したいと考えている.

最後に、本稿で紹介した一連の研究を遂行するにあたり, 終始懇切丁寧な御指導,御鞭撻を賜った東北大学大学院工学 研究科 山中一司教授に深甚の謝意を表する.また,本誌に おいて,著者の研究を紹介する機会を与えて頂いた関係各位 に感謝申し上げる.

文 献

- $(\ 1\)\$ W. Elber: Eng. Fract. Mech., $\mathbf{2}(1970)$, 37–45.
- (2) S. Horinouchi, M. Ikeuchi, Y. Shintaku, Y. Ohara and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys., 51 (2012), 07GB15.
- (3) O. Buck, W. L. Morris and J. M. Richardson: Appl. Phys. Lett., **33**(1978), 371–373.
- (4) I. Solodov and C. A. Vu: Acoust. Phys., **39**(1993), 476–479.
- (5) K. Yamanaka, T. Mihara and T. Tsuji: Jpn. J. Appl. Phys., 43 (2004), 3082–3087.
- (6) Y. Ohara, T. Mihara and K. Yamanaka: Ultrasonics, **43**(2006), 194–199.
- (7) Y. Ohara, T. Mihara, R. Sasaki, T. Ogata, S. Yamamoto, Y. Kishimoto and K. Yamanaka: Appl. Phys. Lett., 90(2007), 011902.
- (8) Y. Ohara, S. Yamamoto, T. Mihara and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys., 47 (2008), 3908–3915.
- (9)山本 摂,小原良和,三原 毅,山中一司:非破壞検査,57 (2008),198-203.
- (10)小原良和,山中一司:電子情報通信学会和文論文誌(A), J91-A(12)(2008),1116-1124.
- (11)小原良和,橋本真琴,堀之内聡,新宅洋平,山中一司:電子 情報通信学会和文論文誌(A), **J94-A(11)**(2011),800-808.
- (12) Y. Ohara, Y. Shintaku, S. Horinouchi, M. Ikeuchi and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys., **51**(2012), 07GB18.
- (13) M. Ikeuchi, K. Jinno, Y. Ohara and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys., **52**(2013), 07HC08.
- (14) Y. Ohara, H. Endo, T. Mihara and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys., 48(2009), 07GD01.
- (15)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:非破壞検査,60(2011),658-664.
- (16) 小原良和,山中一司:検査技術, 13(2008), 8-14.
 (17) K. Yamanaka, Y. Ohara, M. Oguma and Y. Shintaku: Appl.
- Phys. Express, 4(2011), 113-121. (18) 山中一司,小原良和,小熊みゆき,新宅洋平:非破壊検査, 61(2011),076601.
- (19) Y. Ohara, S. Horinouchi, M. Hashimoto, Y. Shintaku and K. Yamanaka: Ultrasonics, **51**(2011), 661–666.
- (20) Y. Ohara, K. Takahashi, S. Murai and K. Yamanaka: Appl. Phys. Lett., 103 (2013), 031917.



小原良和

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★ 2007年3月 東北大学大学院工学研究科博士後期課程 修了
2007年4月 東北大学夫来科学技術北同研究センター

2007 + 4 /]	木和八子木木竹子以前六内町九モノノ
	教育研究支援者
2007年6月	東北大学未来科学技術共同研究センター
	産学官連携研究員
2008年2月	東北大学金属材料研究所 COE フェロー

2008年5月-現職

専門分野:超音波非破壊評価,非線形超音波 ◎主に閉じたき裂の非線形超音波計測の研究に従事.
