

# 非線形超音波による微細損傷の画像化

## Imaging of Small Defects and Tight Cracks with Nonlinear Ultrasonics

超音波材料診断研究所 川嶋紘一郎 Koichiro KAWASHIMA Member  
超音波材料診断研究所 村瀬守正 Morimasa MURASE  
名古屋工業大学 伊藤智啓 Toshihiro ITO

Nonlinear ultrasonic imaging technique is applied for detection and sizing of tight cracks. Tight crack surfaces are clapped and rubbed repeatedly by high-powered burst waves, thus higher and sub-harmonics are generated. By using a band-pass or high-pass filter, the second and higher harmonic components are extracted from the received signals and the amplitude map is constructed. We can make the ultrasonic images of the cracked surface itself, by focusing the ultrasonic beams on peaks of rugged cracked surface, and receiving the backscattered transverse wave. The amplitude mapping of the second and higher harmonics generated at the tight crack surface by a high-powered tone-burst wave pulser gives us clear images of tight crack surfaces. We can evaluate the depth of the tight cracks with the B-scan images of second and higher harmonics.

**Keywords:** Nonlinear Ultrasonic, Tight Crack, Imaging, Harmonic Generation, Crack Sizing

### 1. 緒言

従来の広帯域パルス波を用いる線形超音波法（横波端部エコー法, TOFD 法, フェイズドアレイ法）では、超音波が密着したき裂面をかなり透過し反射波振幅が低下するため、その検出が容易でない。このため、原子力発電所ステンレス鋼配管の応力腐食割れ（SCC）の深さ測定において、寸法測定誤差を考慮して、当面測定値に 4.4mm の余裕を加えることとされている。ただし、PD(Performance Demonstration) 資格を有する検査技術者が測定した場合には、この加算は不要である。このため、上記加算を必要としない、新しい信頼性の高い超音波き裂寸法評価法が求められている。

局部冷却あるいは加熱により発生させた曲げ応力により、密着き裂を開口させ、従来線形超音波法によりき裂寸法を測定する方法[1]が提案されている。

しかし、この方法では 1 箇所について数分程度の測定時間を必要とする。その場で短時間で密着したき裂を検出するため、き裂部に大振幅超音波を入射し、密着き裂部で励起される高調波[2]（入射周波数の整数倍の周波数を持つ波）、あるいは分調波[3]（入射周波数の分数の周波数を持つ波）を使用する方法が試みられている。

筆者らは、水浸集束探触子を用いて微細損傷部で励起される 2 次高調波振幅を画像化[4]する方法を開発し、また最近では、集束横波後方散乱波振幅を用いて微細開口き裂面自体を画像化[5]する方法を開発した。

本報告では、上記 2 方法を結合することにより、2 次及び高次高調波振幅を用いて、従来線形超音波法で検出困難な密着き裂面を高い S/N 比で検出・サイジングできることを示す。

### 2. 基本概念

疲労き裂面はき裂先端部の局部塑性変形によるストライエーション、また粒界応力腐食割れは結晶粒オーダーの微細な凹凸を伴う(Fig. 1)。この微細な凹凸面を超音波が部分的に透過するので、平面探触子を用いるパルス反射法では、き裂面の直接画像化ができない。

連絡先：川嶋紘一郎, 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町名古屋工業大学インキュベーション施設内,  
(有) 超音波材料診断研究所, 電話 052-735-7235,  
e-mail: kkawas@nitech.ac.jp

上記き裂面に降伏応力程度の圧縮応力が作用しても、一旦形成された微細な隙間が完全に消失することはない。従って、その微細凹凸部に集束超音波ビームの焦点を合わせ、高い増幅によりそこからの散乱波を受信し、それを画像化[5]することが考えられる。

Fig. 1 に示すように、水浸法で点集束探触子を用いて斜角入射し、水/材料界面におけるモード変換横波の焦点を個々の凹凸に合わせ、探触子を走査し受信振幅をマッピングする。この方法を用いると、Fig. 2 左側に示すように、エネルギーの大きい超音波ビームは水/材料界面で反射され、探触子に受信されないので、表面多重反射波による不感帯がほとんどない。このため、欠陥による微弱な散乱波を高増幅で検出することが可能になる。

密着き裂面の平均隙間間隔より大きい振幅の縦波バースト波を入射すると、Fig. 3 に単純化して示す[4]ように、圧縮波によりき裂面が接触した後、圧縮応力は部分的に透過する。しかし、希薄波(引張波)はき裂面で反射される。この繰返しにより、入射正弦バースト波波形にひずみが生じ、周波数域では高次高調波が現れる。

### 3. 水浸高調波計測システム

測定に用いた高調波測定・画像化システムのブロック図[4]を Fig. 4 に示す。従来の超音波画像化装置との違いは、材料中で 10nm 程度の大振幅バースト波を発生させるパルサーと、受信波に含まれる 2 次及び高次高調波を増幅し、それを抽出するバンドパス、あるいはハイパスフィルタを用いることである。

Fig. 4 に示すような斜角入射においては、水の非線形性に比べて、密着き裂面で励起される超音波の非線形性ははるかに大きい。

### 4. 測定例

#### 4.1 横波後方散乱波による SUS304 疲労き裂面の画像化

Fig. 2 の測定配置により、SUS304 平板に導入した部分疲労き裂面の画像化を行った。試験片はノッチ部を除去した厚さ 15mm の板である。Fig. 5(a) に示すようにき裂面側から、中心周波数 5MHz、焦点距離 51mm の点集束探触子を用いて、モード変換横波を入射し後方散乱波を受信し、その振幅を画像化した。Fig. 5(b) が線形短パルス波画像、(c) が入射波 3.5MHz の 2

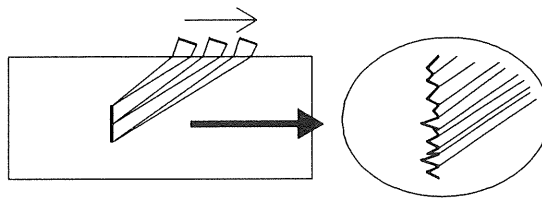


Fig.1 Backscattering from crack surface.

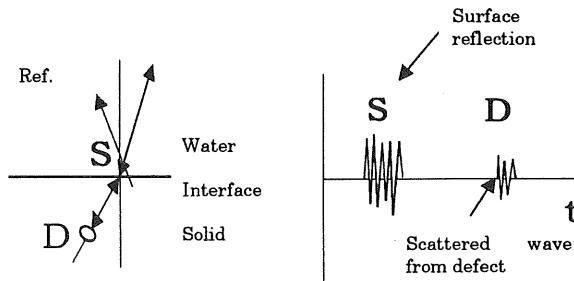


Fig. 2 Model of mode- converted wave propagation and received signal.

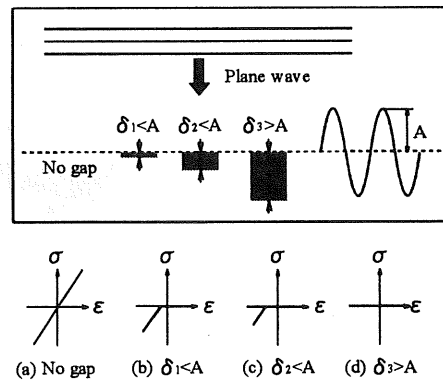


Fig. 3 Clapping model of very narrow gaps comparable to incident wave amplitude.

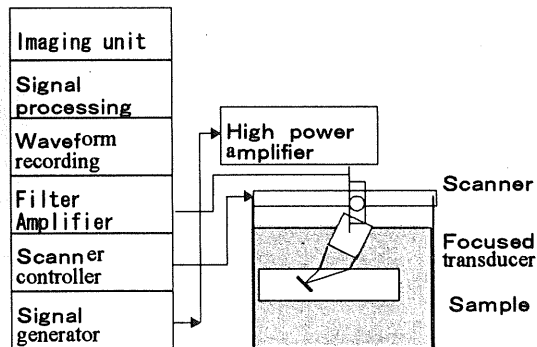


Fig. 4 Ultrasonic imaging system.

次高調波画像である。バンドパスフィルタを用いて基本波（入射波と同一周波数成分）振幅を 40dB 低下させ、2次高調波を抽出した。Fig. 5(d)より 7MHz 成分が大きいことが分かる。線形画像の方がやや大きいき裂深さを示す。

#### 4.2 線形及び非線形超音波による 7075 アルミニウム合金疲労き裂面の画像化

厚さ 10mm のアルミニウム合金 7075 平板に貫通疲労き裂を導入した試験片について、Fig. 6(a)に示す配置で、周波数 30MHz、焦点距離 25mm の点集束探触子を用いて側面から縦波斜角入射により、高次高調波画像化をおこなった。入射周波数は 17.5MHz であ

り、25MHz のハイパスフィルタを用いて、入射波成分を 40dB 低下させた、Fig. 6(c)に示すように、V 溝より下方の疲労き裂部で 2次(35MHz)及び 3次高調波(52.5MHz)が励起されている。

使用したハイパスフィルタでは、V 溝コーナー部の振幅の大きな基本波を十分低減できなかったため、V 溝に沿った輝度の高い部分が表示されている。ちなみに、測定点 4 はき裂から離れた位置であり、高調波は受信されず、基本波に対応する周波数成分が見られるだけである。従って、斜角入射における水の非線形性は密着き裂部により励起される高調波より小さいので、実用上は無視できる。

現実のき裂サイジングにおいては、Fig. 7(a)に示

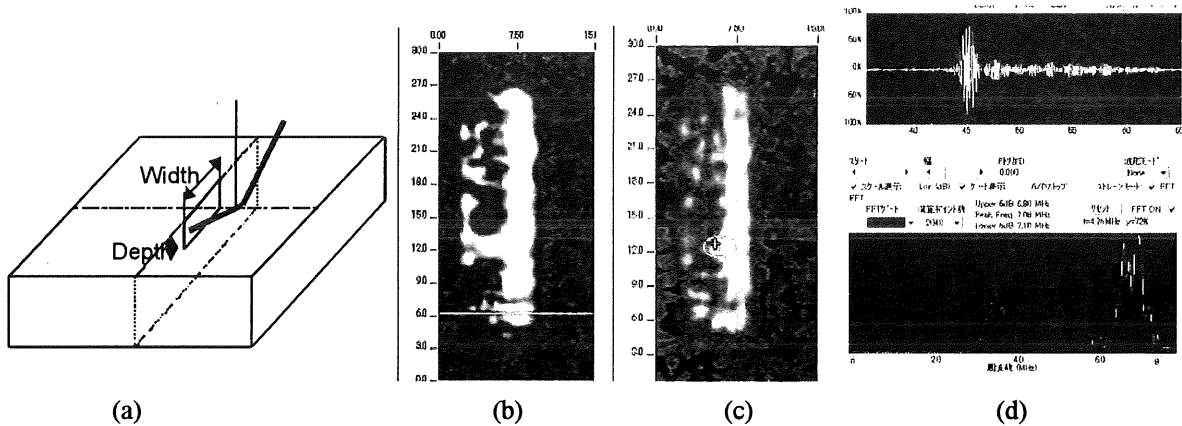


Fig. 5 Fatigue cracked surface image of SUS 304. (a): Measurement scheme, (b) Linear image, (c): Second harmonic image, (d): Received waveform and spectrum.

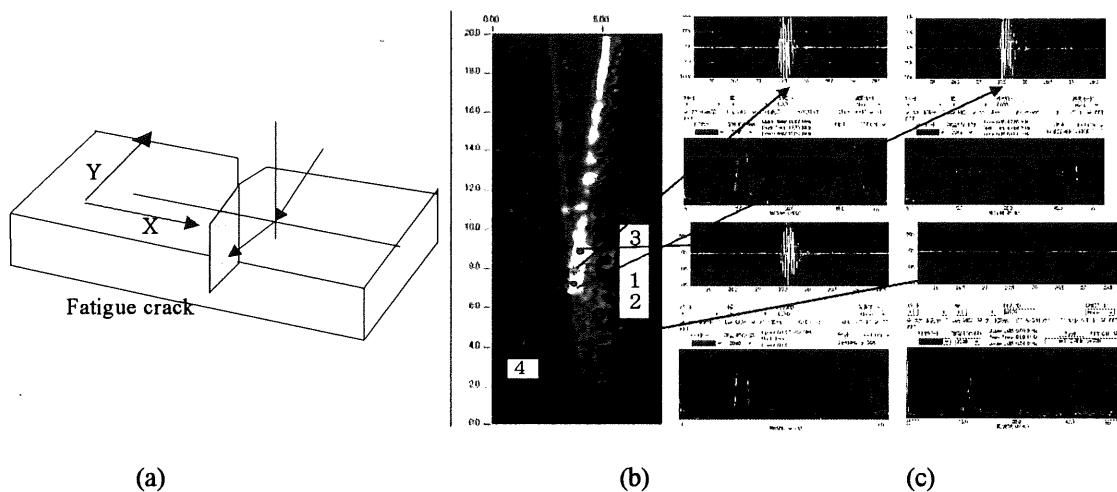


Fig. 6 Second harmonic image of fatigue crack surface of 7075 aluminum alloy. (a): Measurement scheme, (b): Second harmonic image, (c): Waveforms and spectra.

す測定配置でのき裂深さ測定が要求される。そこで、周波数 10MHz、焦点距離 75mm の点集束探触子を用いて、入射角 20 度（横波屈折角 45 度）の斜角入射により、線形パルス波及び 2 次高調波を用いて、同一領域を走査して得た C スキャン像と B スキャン像、ならびに受信波形とそのスペクトルを Fig. 7(b)と(c)に示す。

Fig. 7(b)に比べて、(c)の 2 次高調波 C スキャン像では、き裂先端部が高輝度で表示される。また対応する B スキャン像でも、(b)の線形画像ではコントラストが弱くノイズを含むが、(c)の 2 次高調波画像のコントラストが大きく、き裂面を確実に識別できる。(c)より求めたき裂先端までの距離は 20.5mm、ノッチ底までの距離は 25.6mm であり、目視による 20mm 及び 25mm とほぼ一致する。Fig. 7(c)に示すスペクトルにおいて、2 次高調波とともに 3 次高調波が検出されることもある。

## 5. 結言

水浸集束探触子を用いて密着したき裂部を検出・画像化する方法を示した。線形横波後方散乱波を用いても疲労き裂面をほぼ画像化できる。しかし、大振幅パースト波を入射し、2 次あるいは高次高調波振幅を画像化することにより、線形画像よりはるかに高い S/N 比で密着き裂面を画像化できる。

ハイパスフィルタを用いるとき、2 次及び 3 次高調波が同程度の振幅で検出される理由については、今後検討する必要がある。

## 参考文献

- [1] M. Saka, H. Tohmyoh, H. Okabe and S. R. Ahmed, Proc. FENDT 2006, pp. 33-39.
- [2] O. Buck, W. L. Morris and J. M. Richardson, Appl. Phys. Lett., 33(1978), pp. 371-373.
- [3] I. Yu. Solodov, 1994 IEEE Ultrasonic symposium, pp. 1279-1283.
- [4] 川嶋紘一郎他 6 名, 非破壊検査, 54(2005), pp. 509-514.
- [5] 川嶋紘一郎, 山田龍三, 松田正文, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, 1, pp.677-678.
- [6] 川嶋紘一郎, 小林大輔, 村瀬守正, 日本非破壊検査協会平成 17 年度秋季大会講演概要集, 2005, pp. 135-138.

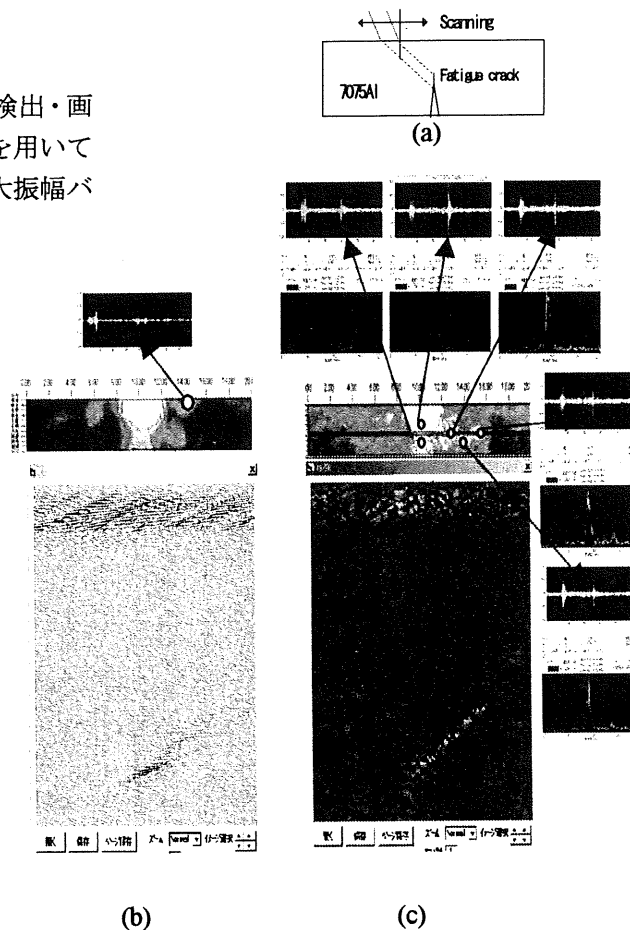


Fig. 7 Linear and second harmonic image of fatigue crack surface of 7075 aluminum alloy. (a): Measurement scheme, (b) Linear C- and B-scan images, (c): Harmonic C- and B-scan images and spectra.