論説

Paper

非線形超音波信号を用いた非破壊検査技術に関する研究 —非線形超音波信号のキャリブレーション技術の開発—

山田龍三*

A Study of Application of Nonlinear Ultrasonic Signal to Nondestructive Inspection Technology — Development of Calibration of Nonlinear Ultrasonic Signal Using a Reference Block —

Ryuzo Yamada

Synopsis

Over the past few decades nonlinear ultrasonic has been researched actively for the purpose of inspection technology for closed cracks or estimation of bonding quality of dissimilar materials. Nonlinear ultrasonic is a harmonic signal generated by a material's nonlinear stress-strain relation or nonlinear reflection phenomena at a closed crack. Considering the practical application of the signal, it is indispensable to establish a calibration method. Reference reflectors, such as flat bottom holes or back wall, are used in the application of conventional pulse echo ultrasonic inspection. However, calibration methods of the nonlinear ultrasonic signal have not been established yet. This paper is intended to investigate calibration method of nonlinear ultrasonic signal. A convex Newton lens was utilized for the purpose of understanding acoustic signal response around a narrow gap. A new calibration test block made of stainless steel was designed to generate a harmonic signal. As a result, effectiveness of calibration of nonlinear ultrasound signal using the block was confirmed.

1. 緒 言

一般的に用いられている超音波探傷法では、入射した超音波に対するきずからの反射信号の振幅や反射波の到達時間を用いて、きずの存在の有無やその位置を検査している。しかし、昨今の品質要求の高度化に伴い、従来の超音波探傷法では検出が困難な閉じた亀裂や、異種材料接合部の健全性評価などの検査ニーズが高まっている。前者の代表例としては、原子力発電施設において溶接部の亀裂高さの定量的な評価が求められるようになったことを受け、端部エコー法やフェーズドアレイ法などさまざまな研究が実施されている¹⁾。しかし、これらの方法は閉じた亀裂の評価においては過小評価する傾向がある²⁾。一方、異種金属接合部の健全性評価においても、音響インピーダンスの差による強い反射信号の影響で微小なき

ず信号が埋没し、探傷性能が低下する弱点が指摘されている³⁾。

このような状況の中で、非線形超音波現象の非破壊検査への適用が盛んに研究されている。非線形超音波法とは、伝播媒質の非線形応力ひずみ特性や反射界面の非線形反射現象により発生する、入射した超音波の整数倍、あるいは、整数分の一の周波数を有する高調波あるいは分調波振幅を用いて材料特性あるいは欠陥を評価する方法である。例えば医療の分野では、生体内の超音波反射信号に対して高調波成分のみを受信して画像化することにより、高分解能かつ高品質な像を合成するハーモニクイメーシング法⁴⁾として、1990年代から実用化されている。一方、物理応用の分野では、1990年代になって、CAN(Contact Acoustic Non-linearity)により連続固体の非線形より桁違いに大きい非線形現象が発生することが確

認められ、本格的な非破壊検査への適用研究が始められた⁵⁾。さらに、圧電素子の高感度化と電子機器の高性能化により、市販の素子を用いた高調波測定が可能となり⁶⁾、1997年には接合強度の評価⁷⁾、2000年には非線形超音波顕微鏡を用いた映像化の研究が実施された⁸⁾。さらに、スポット溶接部、CFRP（炭素繊維強化樹脂）の損傷部、拡散接合部の検査への適用など、各種工業材料の線形／非線形超音波特性と材料の組織構造との関係に関する研究が行われている⁹⁾。一方、周波数が入射波の整数分の一となるサブハーモニクス（分調波）についても、疲労亀裂における閉口亀裂評価への適用研究が行われている¹⁰⁾。

品質保証技術として非線形超音波を利用する場合、機器のキャリブレーションを実施するとともに、きず指示により被検査物の品質を判断するためのしきい値を設ける必要がある。一般的な超音波探傷法の場合は、標準試験片あるいは対比試験片中の平底穴や横穴などの人工きず、あるいは、底面エコー高さが用いられている。一方、非線形超音波の場合は、標準的な信号反射源が確立されておらず、今後の実用化のための重要な課題となっている。そこで、本論文では、ニュートンリング用凸レンズを用いて非線形超音波の発生機構を調査するとともに、容易に非線形超音波を発生可能な試験片を考案し、界面からの反射信号を校正した結果を報告するとともに、非破壊検査技術への非線形超音波適用の可能性を検討する。

2. 非線形超音波の発生理論

弾性波は、慣性力と弾性回復力の間でのエネルギー交換により媒質中を伝播し、たとえば転位の少ない金属材料などのように媒質の応力・歪み関係が線形な場合には (Fig.1(a))、波形ひずみがほとんどなく媒質中を伝わる。一方、水中や微視亀裂などを有する不完全接合面などにおいて、応力・歪み関係は Fig.1(b) に示すように非線形

となり、これにより伝播波形がひずみ、高調波が生じる。

ここで、次の式 (1) を用いて非線形応力・ひずみ関係を有する場を考える。

$$\sigma = K_1 \varepsilon - \frac{1}{2} K_2 \varepsilon^2 \quad (K_2 < 0) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 K_1 は線形弾性定数、 K_2 は 2 次弾性定数を表す。式 (1) の応力・ひずみ関係を有する物質中を伝わる超音波変位は、1 次元波動方程式の解として、次式 (2) で与えられる。

$$u(x, t) = A_1 \exp[i(kx - \omega t)] + \frac{K_2 A_1^2 k^2 x}{8 K_1} \exp[2i(kx - \omega t)] \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 A_1 は基本波の振幅である。これにより、基本波振幅と 2 次高調波振幅 A_2 の比は次式 (3) で表すことができる。

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{K_2 k^2 x A_1}{8 K_1} \quad \cdots \cdots (3)$$

これは、物質の非線形性効果として知られ、非線形パラメータと呼ばれている。非線形パラメータは、弾性係数の比、入射波振幅、伝播距離、波数の 2 乗に比例するパラメータである。従来の超音波探傷に用いる微小振幅 (1 nm 程度) の波に対し、大振幅 (10 nm 程度) の波を用いた場合に発生する 2 次高調波の振幅は市販の機器で検出可能なレベルまで大きくなり、非破壊評価に利用可能となる。

3. 実験方法および実験結果

3. 1 ニュートンリング用凸レンズの利用

接触境界における高調波の発生機構を明らかにするために、曲率 100 m のニュートンリング用凸レンズを用いた。Fig.2 に示す半径 R のニュートンリング用凸レンズを平面ガラスに荷重 P で押し付けた場合の接触半径 a 、最大応力 $P_{\max}$ 、レンズ中心より外周方向を x 軸とした場合

Fig.1. Illustrations of elasticity.

Fig.2. Symbols.

の接触応力分布 $P(x)$ 、および、隙間間隔 $d(x)$ は、ヘルツの弾性接触理論より次式 (4)、(5)、(6)、(7) で表わされる。

$$a = \left\{ \frac{3P}{4} \left(\frac{1 - \gamma_A^2}{E_A} + \frac{1 - \gamma_B^2}{E_B} \right) \right\}^{1/3} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right) \quad (4)$$

$$P_{\max} = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (5)$$

$$P(x) = P_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2} \quad (6)$$

$$d(x) = \frac{x^2 - a^2}{2R} \quad (7)$$

ただし、 E はヤング率、 γ はポアソン比である。Fig.3 に、測定中のニュートンレンズ用凸レンズで観察された干渉縞を示す。接触境界位置は、計算値（ヤング率 $7.35 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、ポアソン比 0.3）と良好な一致を示した。

Fig.3. Newton rings observed.

3. 2 非線形超音波測定装置

Fig.4 に非線形超音波測定装置の構成を示す。レンズは円筒ケースに収納し、上側のレンズを下側の光学平板にネジで押し付けることにより接触界面に荷重を加えた。また、レンズとケースとの間をシールし、接触界面および荷重測定用ロードセルへの水の浸入を防止した。超音波発生器（パルサー）としては RITEC 社製 RAM-5000 を用い、大振幅バースト波（8 波、3.5 MHz）を中心周波数 5 MHz の広帯域超音波探触子に加え、7 MHz の高調波を

Fig.4. Block diagram of the experiment with Newton rings.

受信した。試験材からの反射波は、アナログフィルタを介して 2 次高調波成分を 40 dB 増幅し、レシーバ（RITEC 社製 BR-640）を用いて受信し、出力信号を 100 MHz、8 bit で AD 変換後にコンピュータに記録した。なお、探触子は 0.2 mm ピッチで 30 mm 角の領域を走査し、すべての測定点における受信波形をメモリに記録してから、接合界面からの信号を抽出し、周波数解析 (FFT) により基本波および 2 次高調波成分の強度を算出し、C スキャン画像を構成した。実験条件を Table 1 に示す。なお、レンズ接触界面での超音波の振幅は、レーザ干渉計を用いた測定の結果、約 $1.2 \times 10^{-2} \text{ nm/V}$ （V は印加電圧）であった。Fig.5(a) にレンズ界面からの反射波の一例を、Fig.5(b) にその周波数解析例を示すが、非線形反射による波形のひずみが周波数解析で周波数 6.6 MHz に相当する 2 次高調波となっていることが確認された。

Fig.6 に測定結果から構成されたレンズ接触界面からの信号の C スコープ画像を示す。基本波 A_1 、および、2 次高調波 A_2 は、レンズ中央の接触部で信号強度が低下し、非線形パラメータ A_2/A_1 は、レンズ接触界面の外側で信号強度の強いリング状の領域が確認された。

Table 1. Condition of the experiment with convex lens for Newton ring.

Content	Value
Pulser	RAM5000
Receiver	BR640
Transducer	5 MHz, F4
Incident frequency	3.5 MHz
Received frequency	7 MHz
Number of cycles	8
Sampling frequency	100 MHz
Scan index	0.2 mm
Applied voltage	437 – 874 V
Load	49 – 216 N
Water path	27 – 47 μs

(a) A-scan of a reflection from the interface.

(b) Result of FFT analysis.

Fig.5. A-scan and a result of FFT analysis.

Fig.6. C-scan images of the lens.

3.3 ニュートンリング横断面における超音波信号の変化

超音波の振幅、接触応力、水距離を各3水準変化させ、レンズ横断面における基本波 A_1 、2次高調波 A_2 、および、非線形パラメータ A_2/A_1 の変化を比較した結果を Fig.7 に示す。いずれのグラフにおいても、Fig.6 に示したC スコープと同様、レンズ接触境界より中心部で信号強度が低下し、2次高調波 A_2 は、レンズ接触境界の外側で信号値が極大となっている。また、超音波振幅および水距離の増加とともに2次高調波 A_2 は単調に増加し、さらに、荷重の増加とともに、界面からの信号値がゼロとなる透過領域が拡大している。

レンズの接触応力、および、隙間間隔と信号強度の関係を詳細に調べるため、Fig.2 に示したニュートンリングの接触応力と隙間間隔を式(4)～(7)を用いて計算し比較した。Fig.8(a) に計算結果を、Fig.8(b) に測定値を示す。これより、以下が明らかになった。

- ・基本波 A_1 は、隙間 $< 300 \text{ nm}$ で透過を開始し、接触圧力が $1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ より大きい領域では99%以上透過する。
- ・2次高調波 A_2 は、隙間が約 150 nm で最大となり、隙間の減少とともに小さくなる。接触領域においては、接触圧力が $0.7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ で再び極大値を示し、

さらなる圧力の増加により2次高調波 A_2 の強度は減少する。

- ・非線形パラメータ A_2/A_1 は、隙間 $= 50 \text{ nm}$ で最大となり、接触境界（隙間ゼロ）で最小値となる。接触領域においては、2次高調波の減少に比べ基本波の減少割合が大きいことより、非線形パラメータ A_2/A_1 は著しく増加する。

一方、測定条件の相違により発生する接触境界近傍の2次高調波 A_2 の信号強度の変化について、Fig.9 に示すように、3つの領域（領域A：完全な底面反射部、領域B：接触境界近傍の微小空隙部、領域C：接触領域）における信号強度を、印加電圧、水距離、および、荷重の変化と比較した結果、以下が明らかになった。

- ・領域A：2次高調波は、印加電圧および水距離の増加とともに増加する。水距離の増加とともに約 $0.013 \text{ } \%/ \mu\text{s}$ の割合で増加した。
- ・領域B：2次高調波は、印加電圧の増加とともに増加する。
- ・領域C：2次高調波は、印加電圧の増加とともに増加するが、一定荷重で最大となったあと、荷重の増加とともに減少する。

Fig.7. Effects of applied voltage, applied load and water path on reflected signals across the lens.

4. 信号値の校正

4. 1 校正の考え方

実際の探傷においては、入射超音波の振幅、水距離、および、測定系の非線形性の相違について、校正を行う必要がある。ニュートンリング用凸レンズを用いた実験の結果から、非線形パラメータ A_2/A_1 を β で表し、完全な底面 (Fig.9 領域A) での反射による信号を β_{backwall} 、接

触境界近傍の微小空隙部 (Fig.9 領域B) で生じる信号を β_{air} 、接触領域 (Fig.9 領域C) で生じる信号を β_{contact} とし、入射超音波の振幅を A 、測定系の非線形性を β_{measure} とすると、対象材を測定したときに得られる非線形パラメータ β_{object} は次の式(8)のように表すことができる。

$$\beta_{\text{object}} = A \times \beta_{\text{measure}} \times (\beta_{\text{backwall}} + \beta_{\text{air}} + \beta_{\text{contact}}) \quad \cdots \cdots (8)$$

なお、 β_{backwall} は界面反射率の関数であり、 β_{air} は空隙

(a) Calculated stress and gap at the interface. Applied voltage 847V, load 216N, water path 47 μ s.

(b) Signal response

Fig.8. Stress and Gap dependences of reflected signals.

Fig.9. Effects of applied voltage, applied load and water path on A2.

間隔の関数である。さらに、 β_{contact} は接触応力と接触界面粗さの関数である。このとき、試験材底面などの標準反射面の測定によって得られる非線形パラメータ $\beta_{\text{reference}}$ は、次の式 (9) のように表すことができる。

$$\beta_{\text{reference}} = A \times \beta_{\text{measure}} \times \beta_{\text{backwall}} \quad \dots \quad (9)$$

ただし、A は定数である。したがって、 β_{object} を標準反

射面の測定により得られる非線形パラメータ $\beta_{\text{reference}}$ で除すと、次式 (10) を得ることができる。

$$\frac{\beta_{\text{object}}}{\beta_{\text{reference}}} = \frac{A \times \beta_{\text{measure}} \times (\beta_{\text{backwall}} + \beta_{\text{air}} + \beta_{\text{contact}})}{A \times \beta_{\text{measure}} \times \beta_{\text{backwall}}} = \frac{\beta_{\text{backwall}} + \beta_{\text{air}} + \beta_{\text{contact}}}{\beta_{\text{backwall}}} \quad \dots \quad (10)$$

もし、標準反射面の大きさがビーム径よりも大きく、かつ、空隙を伴う界面の評価を行う場合、接触領域で生じる信号 (β_{contact}) は無視しうる程度に小さくなる。したがっ

て式 (10) は、次式 (11) のように表すことができる。

$$\frac{\beta_{object}}{\beta_{reference}} = 1 + \frac{\beta_{air}}{\beta_{backwall}} \quad (11)$$

一方、空隙を伴わない材料中の微視亀裂を評価する場合には、接触境界近傍の微少空隙部で生じる信号 (β_{air}) は生じない。そこで、式 (10) は、次式 (12) のように表すことができる。

$$\frac{\beta_{object}}{\beta_{reference}} = \frac{\beta_{contact}}{\beta_{backwall}} \quad (12)$$

以上を整理すると、

$$\beta_{air} = \beta_{backwall} \left(\frac{\beta_{object}}{\beta_{reference}} - 1 \right) \quad (13)$$

$$\beta_{contact} = \beta_{backwall} \times \frac{\beta_{object}}{\beta_{reference}} \quad (14)$$

となり、標準反射面からの反射信号の非線形パラメータ $\beta_{backwall}$ が既知の場合には、微少空隙部で生じる信号 β_{air} 、および、接触領域で生じる信号 $\beta_{contact}$ を、入射超音波の振幅、水距離、および、測定系の非線形性の影響を受けずに測定することができる。なお、 $\beta_{backwall}$ が未知であっても、水距離を一定にすることにより、測定結果の校正は可能である。

4. 2 校正試験片

Fig.10 に、校正試験片の外観および構造を示す。接触界面による高調波を発生させるため、端面を表面粗さ 100 nm に研磨したステンレス鋼製円盤を 4 本のネジで密着させ、接触面の外周部には水の浸入防止のためシールを施した。なお、完全反射面からの信号 ($\beta_{backwall}$) を得るため、試験片中央部に $\Phi 5$ mm の穴を加工した。

Fig.11 に、校正試験片の C スコープ解析画像例を、Table 2 に探傷条件を示す。実験では、空間分解能を向上させるため、中心周波数 10 MHz の広帯域探触子を用い、周波数 7.5 MHz の超音波を入射し、15 MHz の 2 次高調波を検出した。Fig.11 から、4 本のネジに囲まれた領域には信号強度の小さい密着した領域が存在していることがわ

Table 2. Condition of the experiment with calibration test block.

Content	Value
Pulser	RAM5000
Receiver	BR640
Transducer	10 MHz, F3
Incident frequency	7.5 MHz
Received frequency	15 MHz
Number of cycles	5
Sampling frequency	250 MHz
Scan index	0.25 mm
Applied voltage	800 - 1200 V
Water path	48 μ s

Fig.10. Appearance and structure of the calibration test block.

Fig.11. C-scan image of nonlinear parameter, A_2/A_1 , of the calibration test block.

かる。また、ネジの周囲に信号強度の高い領域が存在し、ニュートンリング用凸レンズを用いた実験と同様に接触境界の外周部に強い非線形信号が発生していることが確認された。

4. 3 校正の効果

式 (13) に示した校正の効果を確認するため、印加電圧を変化させ、C スコープ画像を取得し、校正を試みた。Fig.12(a) ~ (c) に各印加電圧での非線形パラメータ A_2/A_1 の C スコープイメージについて、中央部の $\Phi 5$ FBH(Flat Bottom Hole) に相当する信号値を用いて校正した結果を、Fig.13 に校正前と校正後の C スコープ内での信号強度の変化を示す。これらから、校正によりいずれのイメージにおいても、同等の信号強度が得られ、校正が可能であることが確認された。

なお、水距離の変動に対する校正は、フォーカスプローブを用いた場合の距離振幅特性の変化に対する補正も必要である。また、測定系の校正に加え、探傷結果の良否を判定するためのしきい値を決定するための標準信号を得る必要がある。たとえば、本稿で考案した校正用試験片の接触界面で生じる高調波信号を利用可能であるが、信号強度の再現性の評価が必要である (Fig.13 縦軸)。

Fig.12. Amplitude dependences of C-scan images with calibration.

Fig.13. Results of the calibration.

5. 結 言

ニュートンリング用凸レンズ、および、キャリブレーション試験片を用いて接触界面からの非線形信号を解析した結果、以下の結論を得た。

(1) ガラス基板の接触界面に入射した振幅 10 nm の超音波は、空隙の間隔が 300 nm 以下で透過を開始する。また、接触圧力が $1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ より大きい領域では 99 % 以上の超音波を透過する。2 次高調波は、隙間が約 150 nm で最大となり、隙間の減少とともに減少する。接触領域においては、接触圧力が $0.7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ で再び極大値を示し、さらに応力が増加すると振幅が減少する。非線形パラメー

タ A_2/A_1 は、隙間 = 50 nm で最大となり、接触境界（隙間ゼロ）で最小となる。

(2) 表面粗さ 100 nm のステンレス鋼材を用いた校正用試験片を用いて、2 次高調波を得ることができた。

(3) 入射超音波の振幅、および測定系の非線形性による影響を校正するため、試験材の探傷結果を標準反射源の信号で除した結果、入射超音波の振幅変動の影響を補正することができた。さらに、標準反射源の非線形パラメータの水距離依存係数が求めることができれば、水距離の異なる測定データを校正することは可能である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、理論的なご指導とご助言を賜りました有限会社超音波材料診断研究所川嶋絃一郎所長、および、実験のご協力をいただきました村瀬守正博士にお礼を申し上げます。

(文 献)

- 1) 古川敬, 古村一郎, 山下裕宣, 福田俊彦, 徳間英明: 超音波による非破壊評価シンポジウム, 13 (2006), 75.
- 2) 川嶋絃一郎, 永溝久志: 超音波による非破壊評価シンポジウム, 13 (2006), 31.
- 3) Ryuzo Yamada, Koichiro Kawashima, Morimasa Murase: Research in Nondestructive Evaluation, 17(2006), 4, 223.

- 4) 超音波の非線形現象と Harmonic Imaging の有用性, 日放技誌, **51** (2004), 991.
- 5) I. Yu. Solodov, A. F. Asainov, Ko Sel Len : Ultrasonics, **31**(1993), 2, 91.
- 6) D. J. Barnard, G. E. Dace, D. K. Rehbein, O. Buck : Journal of Nondestructive Evaluation, **16**(1997), 2, 77.
- 7) Yongping Zheng, Roman Gr. Maev, Igor Yu.Solodov : Can. J. Phys., **77**(1999), 927.
- 8) Fedar M. Severin, Brian O'Neill, Roman Gr. Maev : CP509, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2000, 881.
- 9) K. Kawashima, M. Murase, Y. Ohara, R. Yamada, H. Horio, T. Miya, F. Fijita : Proc. 16th World Conf. Nondestructive Testing, CD-ROM (2004) .
- 10) K. Yamanaka, T. Mihara, T. Tsuji : Jpn. J. Appl. Phys., **43**(2004), 3082.