

溶接欠陥を持つ試料から発生する 2 次高調波超音波の検出

Detection of Second Harmonic Ultrasonic Wave Generated from Specimen with Weld Defect

○杉浦 竜也*, 福田 誠*, 今野 和彦*

○Tatsuya Sugiura*, Makoto Fukuda*, Kazuhiko Imano*

*秋田大学 大学院工学資源学研究科

*Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード : 2 次高調波超音波(Second Harmonic Ultrasonic Wave), Lamb 波(Lamb Wave)

溶接欠陥(Weld Defect), 接触型音響非線形性(Contact Acoustic Nonlinearity)

連絡先 : 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 大学院工学資源学研究科 電気電子工学専攻
福田 誠, Tel : (018)889-2484, Fax : (018)837-0406, E-mail : mfukuda@gipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

溶接は建設や自動車業界などにおいて多く使用されている。溶接部において、初期段階の疲労き裂や応力腐食割れのような閉口き裂が存在した場合、閉口き裂が進展し開口き裂となり破壊や破損等につながる可能性がある^{1,2)}。そのため、溶接欠陥である閉口き裂の早期検出が望まれる。

溶接欠陥の検出には様々な検査法があるが、溶接内部に存在する欠陥の検出には超音波探傷試験が用いられている。超音波探傷試験では、溶接部に対して超音波を入射し、欠陥部からの反射波を受波することにより欠陥の有無を判断するパルスエコー法を用いる¹⁾。しかし、パルスエコー法では測定が point-to-point であるため、検査対象が配管等の複雑な形状であると使用できない場合が存在する。そこで、減衰が少なく、長距離伝

搬が可能な Lamb 波の利用が期待されている³⁾。また、パルスエコー法では金属と欠陥(空気)との音響特性インピーダンスの差を利用しているが、き裂幅が nm オーダの欠陥である閉口き裂の場合、音響特性インピーダンスの差が小さいため閉口き裂の検出は困難となる。そこで、近年、接触型音響非線形性(Contact Acoustic Nonlinearity : CAN)という現象を用いた方法が注目されている⁴⁾。CANは、弾性連続体に存在する閉口き裂にき裂幅よりも大きい振動振幅を持つ有限振幅超音波を入射した場合にき裂面を能動的に開閉させたときの非線形振動により、高調波成分($2f$, $3f$, ...)もしくは分調波成分($f/2$, $f/3$, ...)が発生する現象である⁵⁾。ここで f は入射波の周波数を示している。非線形超音波を用いた溶接欠陥の検出に関しては、過去に分調波を用いた溶接欠陥の検出が報告されている⁶⁾。

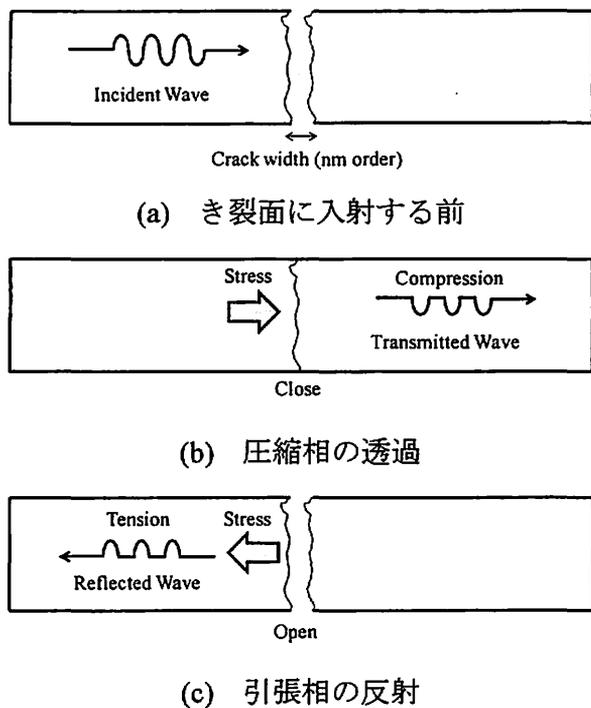


Fig. 1 2次高調波成分の発生原理

しかし、分調波を発生させるためには、高調波を発生させる場合に比べさらに大振幅の音波を閉口き裂面に入射させる必要があるため分調波の検出は容易ではない。そこで、一度に広範囲の測定が可能である Lamb 波および高調波成分の中で最も検出が容易である 2 次高調波成分を用いることが、溶接欠陥の新たな検出方法として活用できると考えられる。

本報告では、溶接欠陥である閉口き裂の早期検出を目的として、溶接欠陥を持つ試料に Lamb 波を伝搬させ、CAN により溶接欠陥から発生する 2 次高調波成分の検出を行う。

2. 閉口き裂から発生する 2 次高調波成分

2-1. 2 次高調波成分の発生原理

CAN により閉口き裂から発生する 2 次高調波成分の発生原理を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a) のように、閉口き裂に対して有限振幅超音波が入射した場合、Fig. 1(b) のように、有限振幅超音波の圧縮相はき裂面同士を衝突させる方向に応力が働くため、圧縮相はき裂の隙

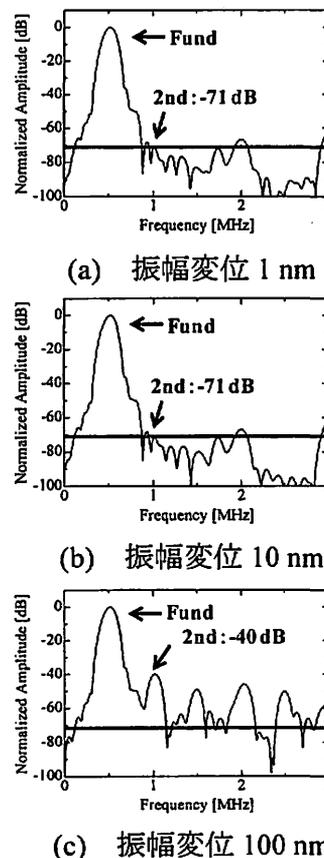


Fig. 2 解析による 2 次高調波成分の検出

間を閉じた後、部分的にき裂面を透過する。しかし、Fig. 1(c) のように、有限振幅超音波の引張相はき裂面を引き離す方向に応力を与えるため、引張相はき裂面を透過せず、反射をする。これを繰り返すことで透過波および反射波が半波整流されたような波形となりひずみが生じ、2 次高調波成分が発生する。

2-2. 数値解析による 2 次高調波成分の検出

CAN の現象により、閉口き裂から発生する 2 次高調波成分の検出が可能であるかを数値解析手法により検討する。き裂幅 10 nm の閉口き裂に対して、中心周波数 500 kHz (基本波) の超音波を伝搬させる。入力波形の振幅変位を 1 nm, 10 nm および 100 nm とし、2 次高調波成分の検出を行う。各振幅における周波数スペクトルを Fig. 2 に示す。各周波数スペクトルは各基本波成分のスペクトルのピーク値で正規化している。Fig. 2(a) および 2(b) より、き裂幅より小さい振幅 (1 nm) および等

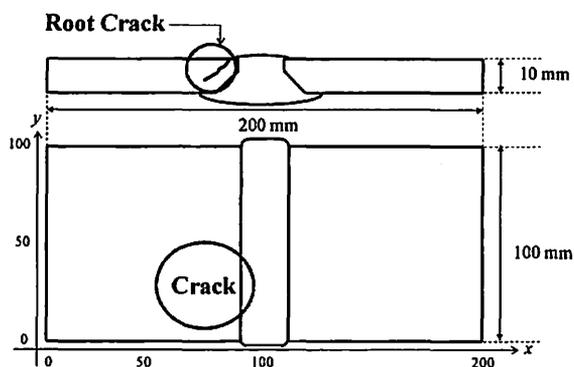


Fig. 3 炭素鋼平板の概略図

しい振幅 (10 nm)の超音波を入射した場合、1.0 MHz (2次高調波)の周波数スペクトルは -71 dB であり、2次高調波成分が検出されていないことが確認できる。一方、Fig. 3(c)より、き裂幅よりも大きい振幅 (100 nm)の超音波を入射した場合には、2次高調波成分の周波数スペクトルは -40 dB であり、2次高調波成分の検出量が 30 dB 以上増加している。2次高調波成分の検出量が増加したのは、CANの現象により閉口き裂から発生したものであると考えられる。上記の現象を利用すれば、2次高調波成分の検出量の増加から閉口き裂の検出が可能であると考えられる。本報告では、2次高調波成分の検出量の増加に着目して溶接欠陥の検出を行う。

3. パルスエコー法による溶接欠陥の検出

3-1. 炭素鋼平板

本報告では、材料の特性が溶接に適していることから多くの分野で使用されている炭素鋼平板を試料として用いる。Fig. 3に本報告で用いる炭素鋼平板の形状と寸法を示す。本報告で用いる炭素鋼平板は、非破壊試験用標準試験片 (sonaspection社, PL 18399)である⁷⁾。この平板は2つの母材を突き合わせ溶接したものであり、溶接欠陥としてルート部に対し平行に走る割れ状の欠陥であるルートクラックが存在している。溶接欠陥は平板の左下端を $x = 0 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$ とすると、 $y =$

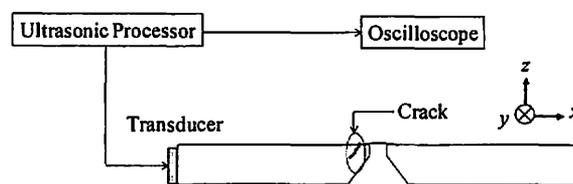


Fig. 4 測定システム
(x方向反射波測定実験)

40mm付近から、 x 軸の負方向に18mm程の長さで存在している。閉口き裂の先端は複雑に分岐していることから、Fig. 3に示す位置において溶接欠陥が存在していると考えられる。

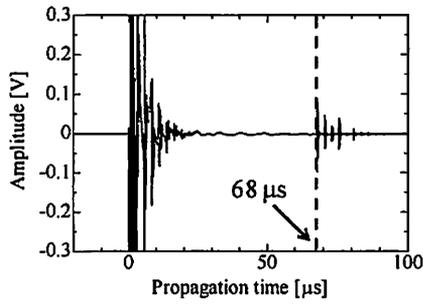
3-2. 測定システム

本報告で用いる炭素鋼平板中の溶接欠陥を、従来のパルスエコー法により検出するために構築した測定システムをFig. 4に示す。超音波パルサーからパルス波を炭素鋼平板に入射させ、受波波形をオシロスコープに取り込む。受波波形より、反射波の受波時間から溶接欠陥の検出を行う。

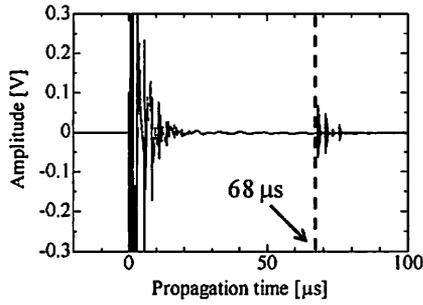
x 軸の正方向に超音波を伝搬させ、 y 軸の正方向に10mmずつ探触子の位置を移動させる実験を、 x 方向反射波測定実験とする。次に、 y 軸の正方向に超音波を伝搬させ、 x 軸の正方向に10mmずつ探触子の位置を移動させる実験を、 y 方向反射波測定実験とする。 x 方向反射波測定実験では、超音波の伝搬距離は400mmであり、 y 方向反射波測定実験では、超音波の伝搬距離は200mmである。伝搬距離と炭素鋼平板の縦波音速より、炭素鋼平板の端からの反射波受波時間を算出すると、 x 方向反射波測定実験では68 μs であり、 y 方向反射波測定実験では34 μs である。

3-3. 測定結果

x 方向反射波測定実験の結果の一例として、溶接欠陥が存在していると考えられる、 $y = 20 \text{ mm}$ の測定点における受波波形をFig. 5(a)に示す。また、溶接欠陥が存在していないと考えられる、 $y = 60 \text{ mm}$ の測定点における受

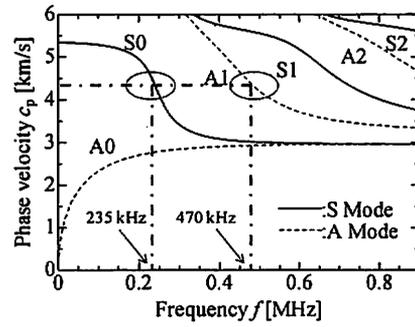


(a) $y = 20$ mm における時間波形

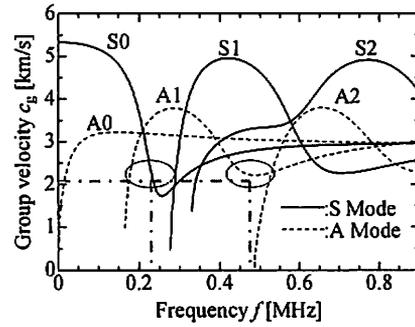


(b) $y = 60$ mm における時間波形

Fig. 5 x 方向反射波測定実験の結果の一例

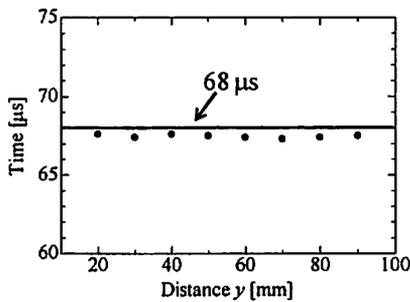


(a) 位相速度

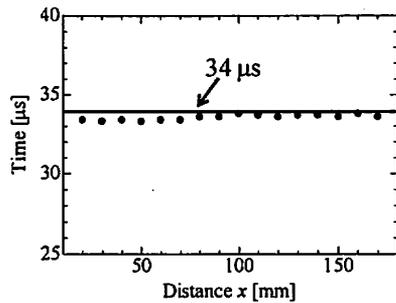


(b) 群速度

Fig. 7 速度分散曲線



(a) x 方向反射波測定実験



(b) y 方向反射波測定実験

Fig. 6 測定結果の比較

波波形を Fig. 5(b)に示す。Fig. 5 より、超音波入射後、1つ目の反射波は溶接欠陥の有無に限らず、 $68 \mu\text{s}$ であることがわかる。

次に、 x 方向反射波測定実験における、各測定点の1つ目の反射波が受波された時間を比較した結果を Fig. 6(a)に示し、 y 方向反射波測定実験における、各測定点の1つ目の反射波が受波された時間を比較した結果を Fig. 6(b)に示す。Fig. 6より、すべての測定点で、炭素鋼平板の端からの反射波が受波される時間において、反射波が検出されていることがわかる。これより、炭素鋼平板中の溶接欠陥は、従来のパルスエコー法では検出できない閉口き裂であると考えられる。

4. Lamb 波の発生原理および駆動周波数

本報告では、減衰が少なく長距離伝搬が可能であることから、有限振幅超音波として Lamb 波を用いる。Lamb 波は平板材料中においてモード変換を繰り返すため、伝搬挙動が複雑となる。複雑な Lamb 波の伝搬挙動は、Rayleigh-Lamb 方程式に平板中の縦波音速 c_L および横波音速 c_T を代入することにより求めることができる。Fig. 7に本報告で用いる

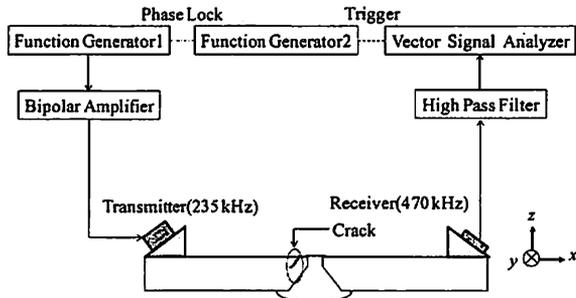


Fig. 8 測定システム

炭素鋼平板 ($c_L = 5700$ m/s, $c_T = 3200$ m/s)の速度分散曲線を示す. Fig. 7では3次以上の伝搬モードは省略している. また, Fig. 7は炭素鋼平板の厚さ $d = 10$ mm で正規化を行っている.

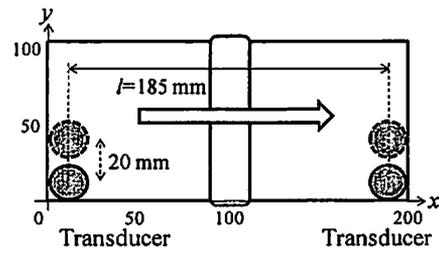
Lamb 波を用いて2次高調波成分の検出を行う場合, 送波した周波数の2倍の周波数に, 送波したモードと同一速度を有する高次のモードが存在することが望ましい⁸⁾. Fig. 7より, 本報告では送波に235 kHzのS0モードを, 受波は2倍の周波数である470 kHzのA1モードを利用する.

5. 溶接欠陥から発生する2次高調波の検出

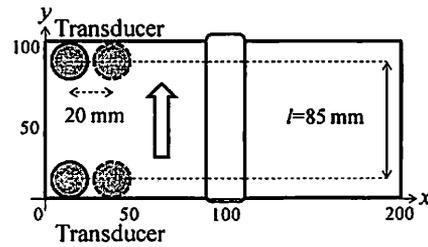
5-1. 測定システム

本報告では, 溶接欠陥として存在する閉口き裂から発生する2次高調波成分の検出を行う. 一般に, 2次高調波成分の周波数スペクトルは基本波成分の周波数スペクトルよりも小さい. 2次高調波成分を効率良く検出するために, 本報告ではアベレージング機能により, リアルタイムで基本波成分を低減させ2次高調波成分を強調するPulse Inversion Averaging (PIA)法を用いる⁹⁾.

本報告で用いる, 透過法により閉口き裂から発生する2次高調波成分を検出するために構築した測定システムをFig. 8に示す. 送波用斜角探触子から235 kHzのLamb波を炭素鋼平板に伝搬させるために, 発振器1より駆動周波数235 kHzのバースト正弦波8波を発



(a) x方向2次高調波検出実験



(b) y方向2次高調波検出実験

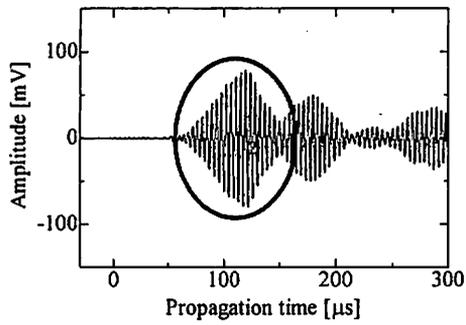
Fig. 9 測定方法

振し, バイポーラ増幅器によって140 V_{p-p}まで増幅させ, 送波用斜角探触子に印加する. その後, 平板中を伝搬したLamb波を受波用斜角探触子で受波し, 直流成分を除去するためにHigh Pass Filter(カットオフ周波数 $f_c = 1$ kHz)を通過させ, Vector Signal Analyzerに取り込み, 周波数スペクトルを観測する. 発振器2では, PIAを行うために発振周期を変えて, 正位相と逆位相の信号を交互に送波する.

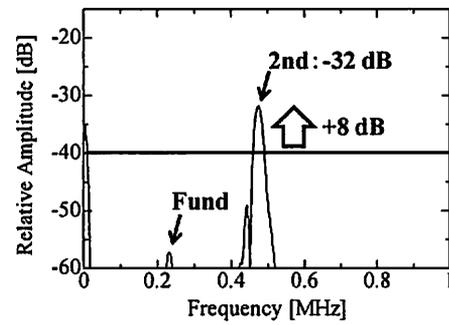
5-2. 測定方法

本報告の測定方法をFig. 9に示す. Fig. 9(a)のように, x軸方向にLamb波を伝搬させ, y軸の正方向に20 mmずつ探触子を移動させる測定をx方向2次高調波検出実験とする. 次に, Fig. 9(b)のように, y軸方向にLamb波を伝搬させ, x軸の正方向に20 mmずつ探触子を移動させる測定をy方向2次高調波検出実験とする. 各測定回数は5回とする. また, 送波用斜角探触子と受波用斜角探触子の位置を取り換え, Lamb波の伝搬方向を変え同様に2次高調波成分の検出実験を行う.

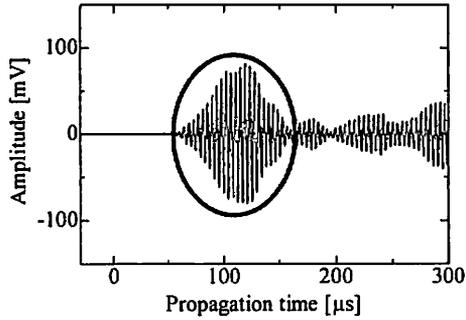
なお, x方向2次高調波検出実験でのLamb波の伝搬距離 $l = 185$ mmとし, y方向2次高



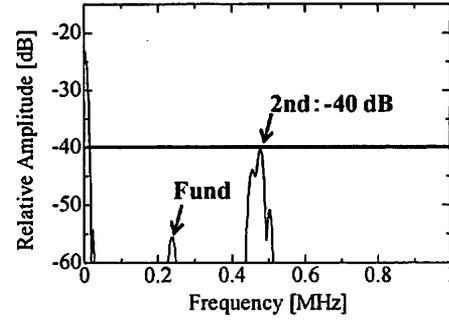
(a) $y = 20$ mm における受波波形



(c) $y = 20$ mm における周波数スペクトル



(b) $y = 60$ mm における受波波形



(d) $y = 60$ mm における周波数スペクトル

Fig. 10 x 方向 2 次高調波検出実験結果の一例

調波検出実験での Lamb 波の伝搬距離 $l = 85$ mm とする。

5-3. x 方向 2 次高調波検出実験

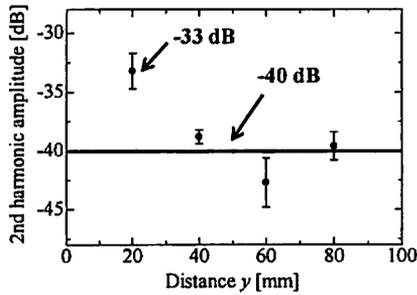
x 方向 2 次高調波検出実験における, x 軸正方向に Lamb 波を伝搬させた際の結果の一例として, 閉口き裂が存在していると考えられる, $y = 20$ mm の測定点における PIA 法適用前の受波波形を Fig. 10(a)に示す. 閉口き裂が存在していないと考えられる, $y = 80$ mm の測定点における PIA 法適用前の受波波形を Fig. 10(b)に示す. Lamb 波を用いた従来の斜角探傷法では, 透過波の受波波形より欠陥の検出を行う. しかし, Fig. 10(a)および 10(b)の受波波形である時間波形からでは, 閉口き裂の有無は確認できないことがわかる. これより, 炭素鋼平板中の閉口き裂は, 従来の斜角探傷法では検出が困難であると考えられる.

$y = 20$ mm の測定点における PIA 法適用後の周波数スペクトルを Fig. 10(c)に示す. $y = 80$ mm の測定点における PIA 法適用後の周波

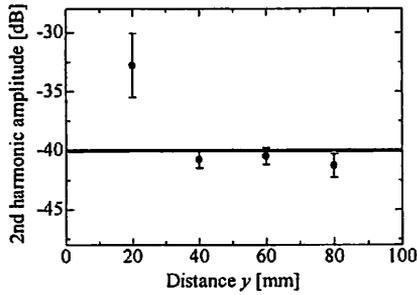
数スペクトルを Fig. 10(d)に示す. Fig. 10(c)および 10(d)より, 閉口き裂が存在していると考えられる測定点において, 2 次高調波成分の検出量が 8 dB 増加している. これより, 2 次高調波成分の検出量に着目することで閉口き裂の検出が可能であると考えられる.

次に, 探触子を 20 mm 間隔で移動させた際の各測定点における 2 次高調波成分の検出量を比較した結果を Fig. 11 に示す. Fig. 11(a)は Lamb 波を x 軸の正方向に伝搬させた際の結果を示しており, Fig. 11(b)は Lamb 波を x 軸の負方向に伝搬させた際の結果を示している. Fig. 11 のプロットは 5 回の測定における平均値を表しており, エラーバーはばらつきを示している. なお, 各周波数スペクトルは, PIA 法適用前の基本波成分のスペクトルのピーク値で正規化を行っている.

Fig. 11 より, Lamb 波の伝搬方向によらず, 閉口き裂が存在していると考えられる $y = 20$ mm の測定点で他の測定点に比べて 2 次高調波成分の検出量が約 7 dB 増加していること

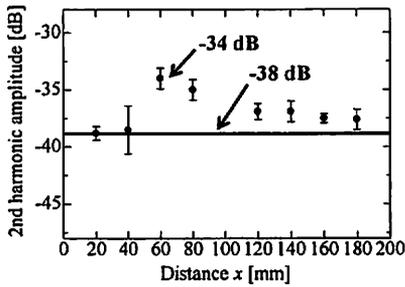


(a) 正方向 Lamb 波伝搬

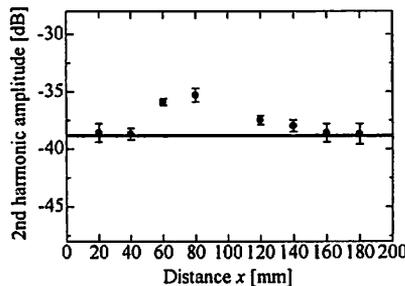


(b) 負方向 Lamb 波伝搬

Fig. 11 x 方向 2 次高調波検出実験の結果



(a) 正方向 Lamb 波伝搬



(b) 負方向 Lamb 波伝搬

Fig. 12 y 方向 2 次高調波検出実験の結果

がわかる。これは閉口き裂において CAN により 2 次高調波成分の検出量が増加したためであると考えられる。これより $y = 20$ mm 付近に閉口き裂が存在していると推定できる。

5-4. y 方向 2 次高調波検出実験

探触子を 20 mm 間隔で移動させた際の各測定点における 2 次高調波成分の検出量を比較した結果を Fig. 12 に示す。Fig. 12(a) は Lamb 波を y 軸の正方向に伝搬させた際の結果を示しており、Fig. 12(b) は Lamb 波を y 軸の負方向に伝搬させた際の結果を示している。Fig. 12 のプロットは 5 回の測定における平均値を表しており、エラーバーはばらつきを示している。なお、各周波数スペクトルは、PIA 法適用前の基本波成分のスペクトルのピーク値で正規化を行っている。

Fig. 12 より、Lamb 波の伝搬方向によらず、閉口き裂が存在していると考えられる $x = 60$ mm ~ 80 mm の測定点で他の測定点に比べて 2 次高調波成分の検出量が約 4 dB 増加している。これは閉口き裂において CAN により 2 次高調波成分の検出量が増加したためであると考えられる。これより $x = 60$ mm ~ 80 mm に閉口き裂が存在していると推定できる。

5-5. 考察

本報告では、透過法により閉口き裂から発生する 2 次高調波成分の検出を行った。Fig. 11 および Fig. 12 より、Lamb 波の伝搬方向に限らず、閉口き裂が存在していると考えられる $x = 60$ mm ~ $x = 80$ mm, $y = 20$ mm の範囲において、他の測定点と比較して 2 次高調波成分の検出量が増加していることが確認できた。2 次高調波成分の検出量の増加は閉口き裂から発生したものであると考えられることができ、 $x = 60$ mm ~ $x = 80$ mm, $y = 20$ mm の範囲に閉口き裂が存在していると考えられることができる。これは、溶接欠陥が存在していると考えられる範囲とほぼ一致することから、本手法を用いて、溶接欠陥として存在する閉口き裂の検出への可能性を示すことができた。

6. おわりに

本報告では、溶接欠陥を持つ炭素鋼平板中に Lamb 波を伝搬させ、2 次高調波成分を用いて溶接欠陥の検出を行った。その結果、閉口き裂が存在していると考えられる $x = 60$ mm $\sim x = 80$ mm, $y = 20$ mm の測定範囲において、他の測定範囲に比べて 2 次高調波成分の検出量の増加を確認できた。また、溶接欠陥が存在していると考えられる範囲とほぼ一致することも確認できた。これより、本手法を用いて、従来の超音波探傷試験では検出できない溶接欠陥の検出への可能性を示すことができた。

今後の課題として、溶接欠陥から発生した 2 次高調波がどのように平板中を伝搬しているのかを把握するために、溶接欠陥を伝搬する Lamb 波の伝搬解析を行うことなどが挙げられる。

《参考文献》

- 1) 溶接学会：“溶接技術の基礎”，精興社，pp. 194-219 (2005)
- 2) 杉本幸郎：日本音響学会誌，61 巻，11 号，pp. 671-676 (2005)
- 3) J. P. Sargent : Insight, Vol. 48, No. 3, pp. 160-167 (2006)
- 4) I. Yu. Solodov : Proc. 1994 IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM , pp. 1279-1238 (1994)
- 5) K. Kawashima, R. Omote, T. Ito and H. Fujita : Ultrasonics, Vol. 48, pp. 611-615 (2002)
- 6) S. Horinouchi, M. Ikeuchi, Y. Shintaku, Y. Ohara, and K. Yamanaka : Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 51, pp. 07GB15-1-5 (2012)
- 7) <http://www.sonaspect.com/SonaCatalog.pdf>
- 8) C. Pruell, J. -Y. Kim, J. Qu, L. J. Jacobs : NDT&E International, Vol. 42, pp. 199-203 (2009)
- 9) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano : Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 45, No. 5B, pp. 4556-4559 (2006)