

研究論文

非線形超音波成分検出による固体接合部の一評価法

今野 和彦*

An evaluation method for contact of solid materials using nonlinear ultrasonic component

Kazuhiko Imano†

An evaluation method for contact of solid materials is proposed. Second harmonic ultrasonic component (SUHC) is detected to extract the information of interface of two glass plates. Dependence of second harmonic component (2MHz) for contact force (1-9 N), percentage of adhesive area (0-90%) and vibration amplitude (10nm-110nm) are respectively measured. As the results, nanometer order irregularity of the surface of contact becomes the source of SUHC and is strongly affected the second harmonic components; SUHC is lineally increased to the contact force and is also increased to the percentage of tight adhesive area. Moreover, increase of SUHC is slight dependent to the vibration amplitude for healthy contacts, but has relatively strong dependency to the contact without contact agent. Necessity of explanation for behavior of SUHC should be considered at the view point of the sound reflection and transmission at the nanometer order gap between two glass plates are also suggested.

Key Words : second harmonic component, nondestructive testing, nonlinear ultrasonic wave, surface irregularity, finite amplitude, piezoceramic transducer, pulse inversion averaging

1. はじめに

近年、超音波を用いた非破壊検査において、非線形超音波を用いた計測が着目されている。従来の線形の計測は基本波 f_0 の周波数で送波した超音波を同じ周波数 f_0 で受波し、その伝搬時間や位相、振幅から計測する手法である。これに対し、非線形の計測は、基本波 f_0 の超音波を送波し、受波波形の周波数スペクトルから非線形成分、すなわち高調波成分 $2f_0, 3f_0, \dots$ あるいは分調波成分 $f_0/2, f_0/3, \dots$ を検出し、評価する手法であり、線形超音波計測では得られない数多くの利点が存在するため、近年研究が行われるようになってきている^{1,5)}。

非線形超音波を用いた非破壊検査では、測定システムに存在する接合部、たとえば変換器と試料、固体表面同士および固体中の閉口き裂などの固体の界面において、線形計測では問題にならなかった非線形超音波が発生しこれらが有する情報も非破壊検査に活用できるものと考えられる。たとえば接着剤などを用いた固体接着部分における非線形超音波の発生は接触型非線形超音波 (CAN: Contact Acoustic Nonlinearity)^{6,9)}とよばれる固体同士の衝突振動によるものであり、接触界面の情報を含んでいると考えられる。このCANを非破壊検査に応用する試みは1979年にBuckらが提案した方法に始まった¹⁰⁾。近年、密着き裂や閉口き裂として定義される開口幅数nm~ μm のき裂に対して有限振幅超音波を送波してき裂を開口させ、き裂面の衝突振動によってCANを発生させてその非線形成分の検出からき裂情報を得る方法が研究されるようになってきている^{2,4)}。

しかしこの方法では、接合部およびそれ以外の音波の伝搬路中で生じる弾性的な非線形性による高調波は成分が同一の周波数で受波されるため、これらが混在し、き裂の過大評価を引き起こすなどの問題が存在する。しかし、一般的に用いられている透過法、反射法の測定システムでは発生メカニズムの異なる上記の2つの非線形による高調波成分を分離することはできないため、固体の接合部における影響については検討が行われていない^{4,6)}。

本論文では接合部における非線形超音波の検出を行い、この非線形超音波の接合状態による変化について実験的な検討を行う。現在、非線形超音波に着目した非破壊検査では、2次高調波が多く用いられていることから、本論文でも2次高調波についての検討を行う。また、固体間の接合部には、ボルト締めなどの閉じ込め応力により接合が行われるものや、境界面に存在する分子の引き付けにより接着などによって接合が行われている接合境界面が存在する。その中でも、セラミック振動子のような超音波変換器素子と測定対象との接合では、固体間の分子の引き付けや凝着あるいは表面の凹凸による不接触によって接合が存在するため後者に属することになる。本論文では、接合部のモデルとして円筒型のPyrex®ガラスを使用し、ガラス表面同士の接着、結合媒質を用いた密着接合および固体同士の単なる接触の3つの状態について、接合部からの2次高調波の検出を行い、接合部についての検討を行って、非線形成分の検出が接合面の状態の評価に利用できる可能性について明らかにする。

2. 接合部における高調波発生の力学モデル解析

図1は光学ガラスの表面をAFMによって画像化したものであり、図からわかるように平坦に見える固体表面でも数十~数百nmオーダーの凹凸が存在することがわかる。有限振幅の音

平成21年8月20日受付;平成22年2月17日受理

*秋田大学工学資源学部 電気電子工学科・教授
〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

†Department of Electrical and Electronic Engineering Faculty of Engineering and Resource Sciences, Akita University, 1-1, Tegata-gakuen-cho, Akita 010-8502, Japan

波を用いた非破壊検査ではこの凹凸により生じた内部空隙がCANの発生要因として考えられ、固体表面の凹凸を含めて接合部の影響を考慮しなければならない。

ここで、表面に凹凸のある固体同士を接着した場合の接合部内部の模式図を図2に示す。同図のように、接合面はすべて均一ではなく、様々な接合状態が存在する。本論文では、無数に存在する接合状態を解釈するため、接合状態を、(a)健全接合部分（接着や凝着および分子間力などによって接触面同士に引力が働いている状態）、(b)キッシングボンド部分（隙間はなく接触しているだけ状態）および(c)非接触部分（空隙など）の3つに単純化して考える。ここで、3つの接合状態を変位と駆動力およびばね定数の関係で検討する。図2のそれぞれの点における接触部分の駆動力 f とこれによる音波の入力による接触部分の変位 x の関係は図3のように表すことができる。(a)の健全接合部分では、連続体の場合と同様に変位-駆動力の関係が線形な関係となるため音波は接合面の影響を受けず、接合面を通過する波形がひずむことがない。一方、(b)のキッシングボンドでは、隙間を圧縮する場合、接触面が接合し音波が伝搬するが、引っ張る場合においては接合面が離れるため音波は伝搬しない。このため x - f 特性が原点付近で折れ曲がり、圧縮と引張の場合ではばね定数 k が異なると考えることができる。また、(c)の非接触部分では、音波の振動変位 x が隙間の幅 Δd よりも大きく($x \geq \Delta d$) となると接触面が接触を開始するため衝突が起こる。すなわち x と Δd の大小関係によってばね定数が変化し、 x - f 特性がこの点から折れ曲がると考えられる。この結果、 x - f 特性から、ばね定数は図3(c)の関係から明らかのように非線形となる。接合面を伝搬する音波は、接合面の通過に

よって波形ひずみを受けることになり、その結果2次高調波などの高調波成分が発生する原因となる。

ここで、2次高調波検出実験を行うにあたり、2次高調波発生量に影響を与えるパラメータについて検討を行う。簡単なVoigtモデルから運動方程式を導出し、図3に示す x 、 f およびばね定数 k の関係からなるモデル¹¹⁻¹³⁾を用いて数値計算を行った。運動方程式を式(1)、(2)に示す。式(2)において $k[x(t)]$ は音波の振幅 $x(t)$ が Δd より小さい場合と大きい場合で場合分けする。すなわちばね定数 k が変位 x に依存することになり非線形成分が含まれることになる。

$$m\ddot{x}(t) + r\dot{x}(t) + k[x(t)]x(t) = A \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

$$\dot{x}(0) = 0, \quad x(0) = 0$$

$$\begin{cases} k[x(t)] = k_1 & x(t) \geq \Delta d \\ k[x(t)] = k_2 & x(t) < \Delta d \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 m は質量、 r は機械抵抗、 k はばね定数、 A は外力となる音波の振幅、 ω_0 は角周波数、 t は時間である。

式(1)、(2)の2階非線形微分方程式から得られる振動変位 $x(t)$ にFFTを行って2次高調波発生量を評価した。変位 x を増加した場合の2次高調波振幅値の変化を図4に示す。同図より、健全接触では、 x - f 特性が直線となるため2次高調波が発生せず、キッシングボンド部分、非接触部分（空隙幅 Δd 以上の変位振幅 x が加わった状態）で2次高調波が発生していることが分かる。そのため、接合部における2次高調波発生量は接合部に加わる変位、空隙幅に依存し、接合状態（健全部、接合部、非接触部の割合）で変化することが推測できる。次節では、これらのパラメータについて実験的な検討を行う。

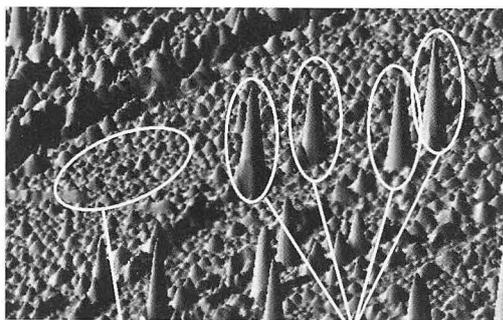


Figure 1 研磨していないガラス表面のAFM画像

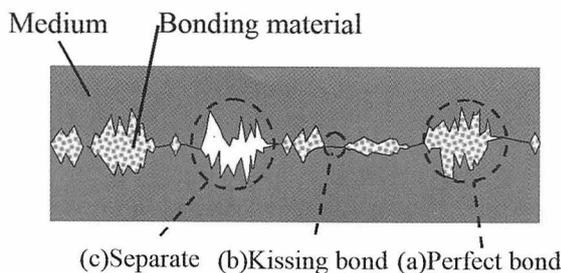


Figure 2 接着層内部の模式図

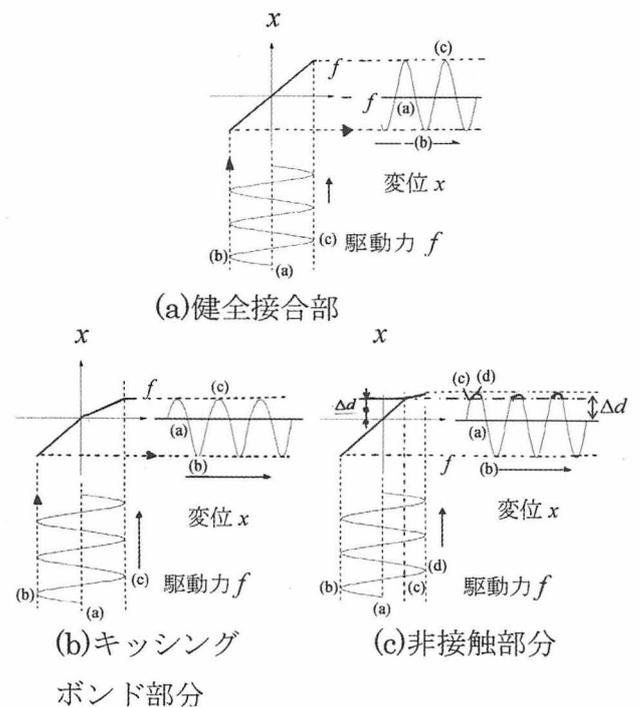


Figure 3 3種類の接合状態に対応する変位 x -駆動力 f 特性 (x - f 特性の傾きが $1/k$ となる。 k はばね定数。

3. 接合部に加わる振動振幅の推定

3.1 振動振幅測定システム

前節で述べた通り、接合部において発生する高調波成分は接合部に加わる振幅に依存して変化する。そこで、本節では図5のシステムを用いて接合部に加わる変位量の推定を行う。これは、次節で行う2次高調波検出実験と同一のシステムである。発振器2より発振された信号は高周波増幅器(Thamway T145-4715B)と高周波増幅器など電気系で発生したスプリアス成分を減衰させるためのバンドパスフィルタ(通過帯域0.7~1.7MHz)を用いて除去した後、整合器を介して振動子に印加される。使用している振動子は円平板型の PbTiO_3 (富士セラミックス社製 チタン酸鉛系磁器 M-6)振動子である。この振動子の共振周波数は1MHzであり、直径は15mm、厚さは2.2mmである。

この振動子を長さ38mm、直径20mmのPyrex®ガラス棒にサリチル酸フェニル(和光純薬工業)を用いて接着し、ガラス板の他の面での振動変位波形をレーザドップラ振動計(GRAPHTEC AT0023 AT3700)を用いて測定する。得られた振動波形はオシロスコープ(Agilent 54845A)で観測され、GP-IBを介してパソコンにデータが保存される。FFTの解析は

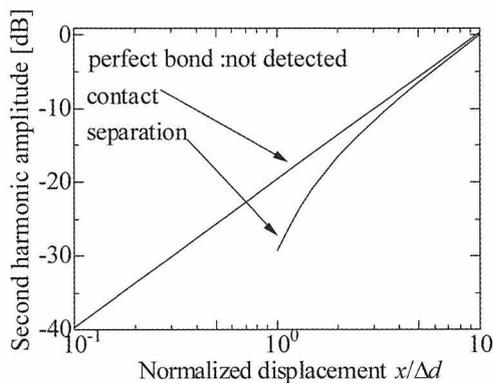


Figure 4 振動振幅と2次高調波発生量の関係

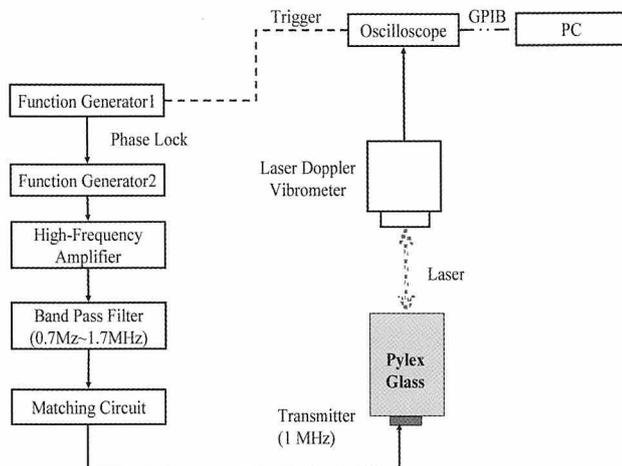


Figure 5 振動振幅測定システム

オシロスコープの機能を利用してリアルタイムで行えるほか、保存されたデータを用いてパソコンでも解析ができる。なお、レーザドップラ振動計では振動変位の他に振動速度および加速度も測定できる。

3.2 測定結果

測定した振動変位波形の振幅(peak-to-peak)と駆動電圧の関係を図6に示す。同図より、駆動電圧と振動変位の関係は線形な関係にあることがわかる。また、振動子の駆動電圧0~65Vに対して接合面となるガラス板端面で0~115nmの変位量が得られており、これが伝搬する音波の振動による接触面の変位 x に相当する。

4. 2次高調波の測定

4.1 測定システム

本節では、2次高調波の測定を行うためのシステムについて述べる。図7に測定システムを示す。送波側振動子の駆動条件は3.1の測定と同一である。ここでは2次高調波の検出を目的としているため、受波側振動子は、円板型の PbTiO_3 (富士セラミックス社製 チタン酸鉛系磁器 M-6)振動子を用いた。この振動子の共振周波数は送波の振動子の共振周波数の2倍の2MHzであり、直径は15mm、厚さは1.1mmである。また、受波側の振動子で受波した信号は高域フィルタ(NF社製 FV-

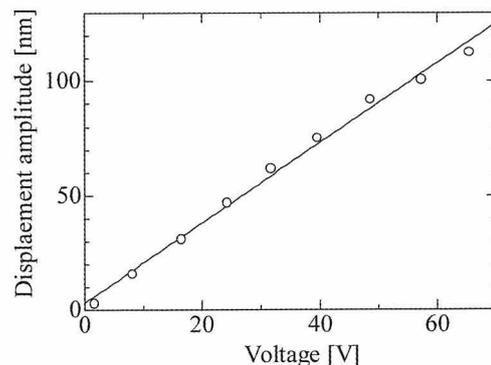


Figure 6 駆動電圧 - 振動振幅 (peak-to-peak)

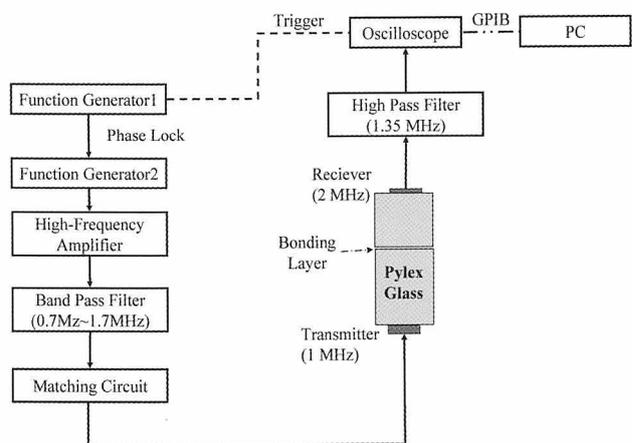


Figure 7 2次高調波測定システム

628B) を介して基本波を減衰させた後にオシロスコープにより観測する。また2次高調波はパルスインバージョンアベレージング (PIA)¹⁾ という2次高調波抽出法をオシロスコープの加算平均機能を用いて行い、2次高調波成分の検出を行う。図8はPIAの原理を説明したものである。図8(a), (b)に示すように互いに逆位相の電圧波形を発生させ、2つの波形を1つの周期 T とする駆動電圧波形を用いて振動子を駆動する。そしてその $T/2$ 周期のトリガ信号を用いて正相と逆相の波形をリアルタイムで加算平均する。その結果、図8(c)の波形および周波数スペクトルに示されるように基本波は打ち消され、伝搬過程で発生した2次高調波は2次の効果のために加算され感度良く抽出することができる。図6における発振器1が $T/2$ 周期のトリガ信号発生に使用する発振器である。

4.2 各種パラメータに対する2次高調波振幅の変化の測定結果

本論文で用いる2次高調波の評価式を式(3)のようにする。

$$20\log(2 \text{ 次高調波の振幅比 } (= A_1/A_0)) \quad (3)$$

ここで、 A_1 は接合部がある場合の高調波発生量、 A_0 は連続体の場合で接合部がない場合の高調波発生量である。送波側の振動子とガラスの接合面でも高調波成分が発生するが、式(3)のように定義することによって、2枚のガラス板の接合部で発生する2次高調波成分の増加分のみを対象として評価できる。実験は、接触荷重、接着状態、接合部に加わる振動変位および接合面の表面粗さを対象とする。

4.2.1 接触荷重

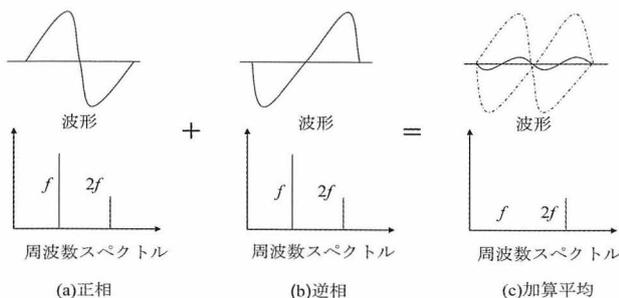


Figure 8 PIAの原理図

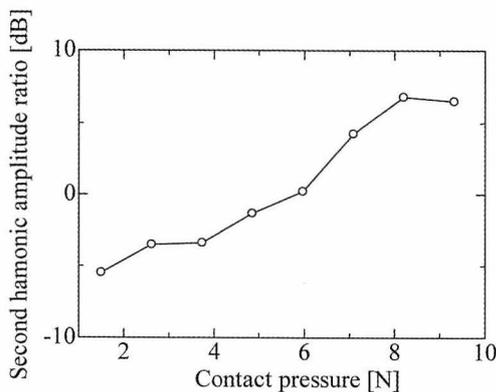


Figure 9 接触荷重-2次高調波振幅比

接合部内部の隙間の幅を変化させるために接合部に加わる接触荷重を変更し2次高調波発生量の測定を行う。この時、接合部に加える振動振幅は115 nmとした。接着剤は、接触荷重の増加により隙間幅を変化させるため、液体の結合剤であるエコゲル (Eco-Med Pharmaceutical製) を用いる。このエコゲルは音響特性インピーダンスが生体組織に近く、超音波を利用した医療用診断装置や非破壊検査といった音響の分野において広く用いられている。

受波波形にFFTを行い、接触荷重と2次高調波振幅比の関係性を求めた結果を図9に示す。用いたガラス試料は長さ19mm、直径20mmのPyrex[®]ガラス棒であり、2個を接触させて実験を行った。図より、接合部に加わる接触荷重が増加するにつれて、2次高調波振幅比が増加することが確認できる。これは、接触荷重の増加により接合部内部の隙間幅が狭くなり内部でガラス面同士の衝突確率が増加したためであると考えられる。図中で接触荷重が5Nよりも小さい場合、2次高調波振幅比が負の値をとっており、接合部があるガラスよりも連続体のガラスのほうが高調波発生量が多くなっている。これは振動子から送波した有限振幅音波が接合部に達するまでにガラス中の弾性的な非線形効果に起因した高調波が発生し、荷重が小さい場合には隙間が大きいために発生した高調波が隙間を透過した高調波のみを受波しているためではないかと考えられる。このため、接合部での音圧透過率を含めた評価法を検討する必要があると考えられるが、接合部の隙間はランダムであると考えられるためこれらを正確に測定することは容易ではない。

4.2.2 接着状態

次に、接合状態を変更させて測定を行う。接合状態を変更するために、固体の接着剤としてサリチル酸フェニル (和光純薬工業株式会社) を用いる。サリチル酸フェニルは融点が40~41℃の結晶であり、容易に融解・凝固を行うことができるためガラス棒の端面同士の着脱が容易で、水中超音波送受波器の接着などによく用いられている。融解したサリチル酸フェニルをガラス表面の中心部分に一定量滴下し、上部から荷重を加えることで接合部の作成を行う。このとき荷重はすべての接合部で5N一定とし、滴下するサリチル酸フェニルの量を変えることで健全接着部の面積を変化させる。このように、健全接着部と空隙などの不健全接着部の面積比を変化させることにより、接合部内部での衝突に起因する高調波の発生量は変化すると考えられる。

接合部に加える振動変位量を最大値の115 nmとして接着状態を変更した場合の測定結果を図10に示す。この図で縦軸は連続体の基本波のスペクトルの最大値で正規化している。同図より健全接着部分の減少とともに高調波発生量は増加していることが確認できる。つまり、不健全接着を起こした接合部から高調波が発生することが実験的に観測できている。しかし、接合部Aの場合、2次高調波振幅が連続体の場合と比較して3dB程度低くなっている。これは図9における結果と同様に伝搬過程で発生した高調波が接合部に入射し、その一部が接合部の隙間で反射されるため透過率が減少するためではないかと考えられる。より正確な評価のためには接合部での音波の反射率や透過率を含めて考えなければならない。ここではPIAを行っているため、基本波の情報が失われているが、基本波の振幅情報を活用することによって反射率および透過率の推定できる可能

性がある。

4.2.3 接合部に加わる振動振幅

本節では接合部に加わる振動変位量に対する特性測定を行う。振動変位を10~115nmまで変化させた場合の2次高調波発生量を測定した結果を図11に示す。振動振幅特性の測定は、4-2-1節の接合部（接着剤：エコゲル 接触荷重1N）、4-2-2節の接合部（接着剤：サリチル酸フェニル 接着部分面積0%、30%）および連続体（長さ38mm）のガラス棒である。

同図より、エコゲルを使用した場合、連続体との2次高調波振幅比がほとんど増加していないことが分かる。この増加量を定量評価するため、それぞれの特性を直線近似し、増加率の評価を行った。その結果、エコゲルの場合の2次高調波振幅比 A_1/A_0 の増加率は0.0226 dB/nm、接合部Bの場合は0.0987 dB/nm、接合部なしの場合は0.3381 dB/nmとなった。

接合にエコゲルを使用した場合は、接合部における2次高調波の発生が小さいことがわかる。これは、接触荷重が低い値であるため、エコゲルの層が数十~数百 μm と厚くなり、接合部ではガラス面同士の衝突が起こりにくくなり、2次高調波発生が少なくなるためであると考えられる。これに対して、固体の接着剤及び接着剤を使用せずにガラス棒同士を単に接触させている場合では2次高調波振幅比は増加している。また、この振幅比は接合部に加わる振動振幅が大きくなるにつれ徐々に大き

くなっていくことが確認できる。これは、接合部内部に様々な幅の隙間が存在し、接合部に加わる振動振幅が大きくなるにつれ固体同士の衝突が起こる点が増加し、その結果2次高調波の発生が増加しているものと考えられる。特にガラス棒を接着剤などを用いずに単に接触させている場合、振動振幅に対して2次高調波の増加が大きくなっており、接合を接着剤などで十分な接合を行うことが重要であることが示唆される。また、大振幅の超音波を用いる測定では、無限小振幅で駆動した場合には問題にならなかった接合部における高調波発生の影響が大きくなるといえる。

なお、エコゲルを使用すれば2次高調波の発生が小さくなるが、上述のように接合層が厚くなることによる音波の透過率の減少や流体であるために変換器が固定できないなどの問題がある。有限振幅音波の利用の際にはこれらの特性を考慮した上で使用する必要がある。

5. おわりに

本論文では、非線形超音波に着目した非破壊検査において、接合部からの2次高調波発生が測定結果におよぼす影響について検討を行った。

その結果、接合部が存在する超音波伝搬経路における2次高調波発生と連続体の場合とを比較した量である2次高調波振幅比 A_1/A_0 が正の値をとることを確認した。また、接触荷重、接着状態、接合部に加わる振動変位振幅に依存して接合部における2次高調波振幅比が変化することを示すことができた。

これらの結果から、非線形超音波に着目した非破壊検査では、接合部の存在が非線形超音波成分の発生源となることが明らかであり、非線形成分が接合部の状態の情報を有していることから個体接合部の接合状態の評価および固体内部のき裂などの評価に応用をはかりたい。

高調波成分の大小は表面の粗さに対する情報を有していることから、今後表面状態の高調波成分の依存性についての検討を行うと共に基本波および高調波成分の接合部での音圧反射率、透過率の測定から接合部の表面状態や凹凸のサイズの評価などにも利用できるようにしたい。

参考文献

- 1) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: "Real time extraction system using double-layered piezoelectric transducer for second-harmonic ultrasonic pulse waves", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 5B, pp. 4556-4559 (2006)
- 2) 山中一司, 小原良和, 山本撰, 三原毅: "き裂の非線形超音波映像法", 非破壊検査, 第56巻, 6号, pp.280-285 (2007)
- 3) 今野和彦, 武藤梓: "有限振幅音波を用いた閉口クラックからの2次高調波の検出", 素材物性学会雑誌, 第20巻, 第1号, pp.12-18 (2007)
- 4) J. Chen, D. Zhang, Y. Mao and J. Cheng: "Contact acoustic nonlinearity in a bonded solid-solid interface", *Ultrasonics* 44, pp.1355-1358 (2006)
- 5) K. Yamanaka, T. Mihara and T. Tsuji: "Evaluation of Closed Cracks by Model Analysis of Subharmonic Ultrasound", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol43, No.5B, pp.3082-3087 (2004)

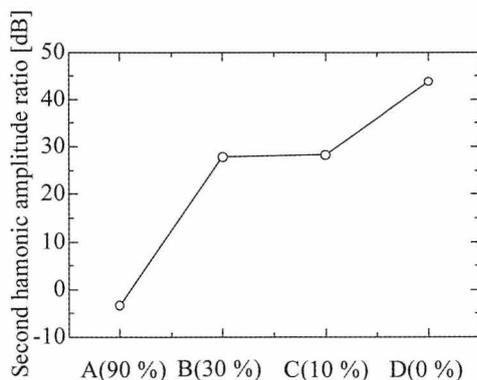


Figure 10 接着状態-2次高調波振幅比

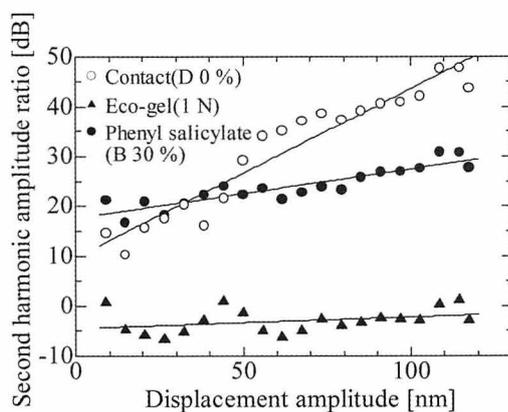


Figure 11 振動振幅-2次高調波振幅比

- 6) J. Chen, D. Zhang, Y. Mao and J. Cheng: "Contact acoustic nonlinearity in a bonded solid-state interface", *Ultrasonics*, 44, pp.1355-1358 (2006).
- 7) I. Yu. Solodov, N. Krohn, and G. Busse: "CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids", *Ultrasonics*, 40, pp.621-625 (2002)
- 8) I. Yu. Solodov and Chin An Vu: "Popping nonlinearity and chaos in vibrations of a contact interface between solids", *Acoust. Phys.* 39(5), pp476-479 (1993)
- 9) I. Yu. Solodov: "Nonlinear NDE Using Contact Acoustic Nonlinearity (CAN)", *IEEE ULTRASONIC SYMPOSIUM*, pp.1279-1283 (1994)
- 10) O. Buck, W. L. Morris and J. M. Richardson: "Acoustic Harmonics Generation at Unbonded Interfaces and Fatigue Cracks", *Appl. Phys. Lett.*, 33, pp.371-373 (1978)
- 11) 井上順吉, 松岡淳男: "機械力学Ⅱ 非線形振動論", 理工学社 (2002)
- 12) 國枝正春: "機械振動学", 理工学社 (1992)
- 13) 末岡淳男, 金光陽一, 近藤孝広: "基礎機械工学シリーズ6 機械振動学", 朝倉書店 (2000)
- 14) 日本工業規格 (JIS): "B 0601 一製品の幾何特性仕様 (GPS) 表面性状: 輪郭曲線方式 用語・定義及び表面性状パラメーター" (2001)