

超音波計測時の固体接触部からの高調波検出

Detection of ultrasonic harmonic component from the contact of solid

○石塚 直樹*, 今野 和彦*
○ Naoki Ishizuka*, 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：高調波(Harmonic), 接触非線形超音波(Contact Acoustic Nonlinearity),
接合層(Joint Layer), 固体接触(Contact of Solid),
表面粗さ(Surface Roughness), 真実接触面積(Real Contact Area)

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
今野 和彦, Tel : (018)889-2494, Fax : (018)837-0406, E-mail : imano@ipc.akita-u.ac.jp

1.はじめに

最近,超音波計測において,高調波を用いて計測を行う手法が用いられるようになってきている¹⁻⁷⁾. そのひとつに,医療分野で既に実用化されているハーモニック(調波)イメージングシステムがある⁷⁾. これは,基本波に比べて減衰が多い高調波の特徴を利用したものである. 高調波を用いることにより,サイドローブおよび多重反射エコーによるアーティファクト(虚像)が低減され,診断画質の空間分解能の向上を実現している.

もうひとつの高調波計測として従来,検出することが困難であった,開口幅が nm オーダのいわゆる閉口亀裂を検出する技術が注目されている¹⁻⁶⁾. この方法は接触非線形超音波(CAN:Contact Acoustic Nonlinearity)⁶⁾を利用する手法である. CAN は,閉口亀裂に亀裂の開口幅と同等かそれ以上の変位を有する大振幅超音波を入射すると,ある音圧以上で隙間幅

が開口し,その後接触境界面が接触,分離を繰り返しながら振動することにより高調波が発生する現象である¹⁾. この CAN により発生する高調波を受波することで閉口亀裂が検出可能であることが報告されている¹⁻⁴⁾. これらの方法は線形計測では得られない数多くの利点が存在する. しかし,ハーモニックイメージングに用いられる探触子の内部は,バックリングや音響レンズ等が積層構造となっており探触子内部の接合層の影響や,また超音波探傷では多点測定を行うため,探触子と測定対象物の接合層の変化などが高調波計測に影響を及ぼすと考えられる. 従来線形計測においては接合層を薄く制御することができれば接合層の影響はほぼ無視できると考えられてきた. しかしながら,固体材料の表面は数十 nm~数 μ m 程度の平均粗さを持つことが知られており⁸⁾,これらの接合面では,微視的には様々な接合状態が存在し,健全に接合され

ている部分の他に、固体材料が接触している部分や、内部に生じた気泡等の影響で不健全接合部分が存在すると考えられる。これらの固体材料の接触面や不健全接合面に高調波計測に必要な大振幅超音波が加わることにより、閉口亀裂の場合と同様に CAN が発生する可能性が考えられる。ハーモニックイメージングにおいてはこの接合層での CAN が媒質中の非線形効果と混在し測定誤差の原因となる可能性が考えられる。また、閉口亀裂の超音波探傷においては探触子と固体材料間の接合層で CAN が生じてしまうと、固体材料中に閉口亀裂がないのにも関わらず閉口亀裂があると計測してしまい、過大評価の原因となる可能性が考えられる。これらのことより、高調波計測においては接合層の影響は無視できない可能性が考えられる。

本研究では、接合層内の固体材料の接触点に着目し、はじめに固体材料の接触状態を変化させると考えられる接触面積、接触圧力、表面粗さと CAN による 2 次高調波の特性について検討を行う。次に、実際の接合境界面での CAN による 2 次高調波の特性と低減法について検討を行う。

2.CAN の発生原理

Fig.1 のような非線形連続体に一定周波数の大振幅超音波を入射すると、ヤング率は応力-ひずみ関係の傾きに対応するため、引張より圧縮の局部ヤング率が大きくなる。固体材料中の音速は $(E/\rho)^{1/2}$ (E : ヤング率, ρ : 密度) に比例するため、一定周期内で圧縮相の音速が引張相より高くなり、Fig.2 に示すように波形ひずみが生じ、周波数領域では高調波が観測される。

実際の亀裂には Fig.3 のように固体材料の残留応力により亀裂面が接触している亀裂

($\delta_1=0$)、入射振幅 A 以下の開口幅($\delta_2 < \delta_3 < A$)をもつ亀裂、入射振幅 A 以上の開口幅($\delta_4 > A$)をもつ亀裂、など様々な状態が存在すると考えられる。亀裂面に大振幅縦波超音波を入射すると $\sigma = \rho cv$ (σ : 応力, c : 縦波速度, v : 粒子速度 $= 2\pi fA$ (f : 入射周波数, A : 振動変位振幅))の応力が材料内に励起されるため、入射振幅 A の超音波を開口幅($\delta_2 < \delta_3 < A$)の亀裂に入射すると、亀裂部分が接触振動を繰り返す。また、固体材料が接触している亀裂部分($\delta_1=0$)においては、超音波の引張り応力により亀裂部分が開口し、接触振動が引き起こされる。このとき、亀裂部分は圧縮相の波により亀裂が部分的に閉じ、圧縮の波は亀裂を越えて伝わる。しかし、引張相の波は亀裂面を引き離そうとするため亀裂面を越えて伝わらない。そのため透過波と反射波は半波整流されたような波形となりひずみが生じ、高調波が発生する。種々の開口幅の亀裂と健全部分の線形応力ひずみ関係との重ね合わせにより、Fig.1 と同様な非線形応力関係が得られるが、この応力ひずみ関係は大きくひずむため、非線形連続体到大振幅超音波を入射した場合と比較し、格段に著しく大きな高調波を発生する^{1,2)}。

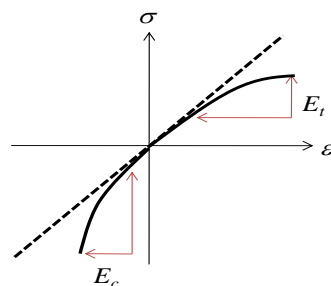


Fig.1 非線形連続体の応力-ひずみ関係

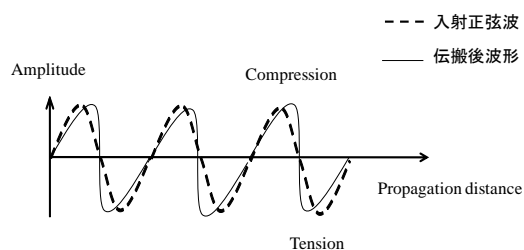


Fig.2 波形ひずみの模式

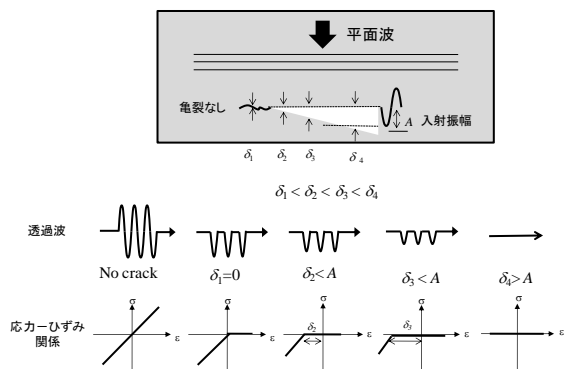


Fig.3 各亀裂面での応力ひずみ関係と透過波

3.2 次高調波測定システム

検討モデルとして、Fig.4 に示すようにガラスに振動子を接合し、ガラスの接触境界面に振動変位を与え CAN を発生させる。測定システムを Fig.5 に示す。まず、CAN は接触境界面に加わる振動変位に密接にしているため Fig.5(a)の測定システムを用いて振動変位の測定を行う。レーザードップラ振動計(グラフテック AT0023, AT3700)によって接触境界面に加わる振動変位分布を測定し、振動変位が最大となる点での電圧-振動変位特性を測定することにより接触境界面に加わる振動変位を把握する。測定結果の Fig.6, 7 より、電圧を制御することで振動変位が約 10~140 nm まで変化することが確認できる。

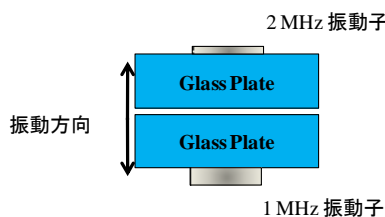
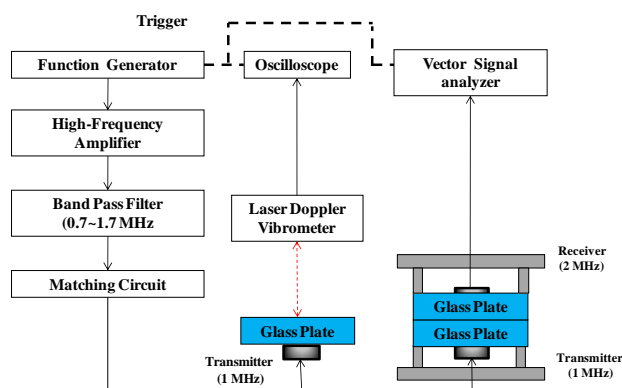


Fig.4 検討モデル

次に測定システム Fig.5(b)を用いて 2 次高調波検出実験を行う。発振器(Agilent 33250A)により、周波数 1 MHz のバースト正弦波 10 波を発振し、これを高周波増幅器(Thamway

T145-4715B)により電圧を増幅し、基本周波数成分以外の周波数成分を減衰させるため、帯域通過フィルタ(大進無線、通過帯域 0.7~1.7 MHz)を通じ、整合器(T020-4734A)により整合をとり 1 MHz の振動子を駆動する。受波側には 2 MHz の振動子を使用し、接触境界面で生じる 2 次高調波を検出し、得られた受波波形をベクトルシグナルアナライザ (Agilent 89441A)により観測する。このときのベクトルシグナルアナライザの設定は伝搬時間 80 μ s、内部フィルタを 0~5 MHz とし、スペクトルにはハニング窓をかけスペクトルの観測を行う。



(a) 振動変位測定システム (b) 2次高調波測定システム

Fig.5 測定システム

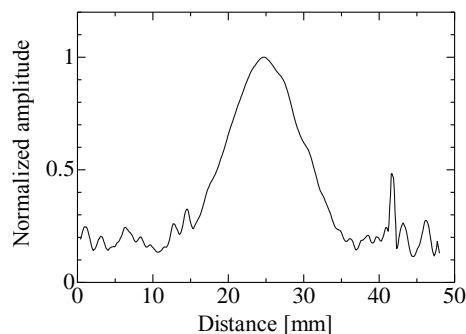


Fig.6 振動分布

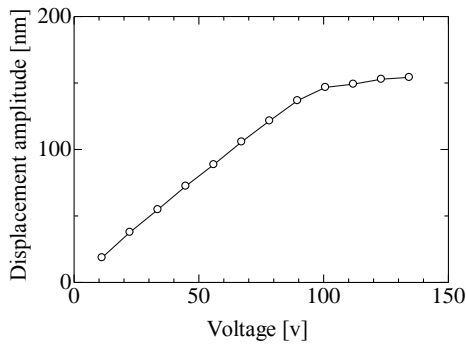


Fig.7 電圧-振動変位特性

4.接触境界面における CAN の特性の検討

4-1 接触面積に関する検討

(a)各接触面積における 2 次高調波検出実験

Fig.8 に示すように $50 \times 50 \text{ mm}^2$ のガラスの周りをカーボランダムにより約 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 程度削り、接触面積を $5 \times 5 \sim 20 \times 20 \text{ mm}^2$ まで変化させ、接触面積の変化に伴う CAN による 2 次高調波の発生量について検討を行う。接触境界面に加わる振動変位は約 100 nm 、接触圧力を 0.04 MPa 一定とし、ガラスの接触状態を考慮するため 90° ずつ回転させ 20 回測定を行う。測定結果を Fig.9 に示す。Fig.9 より、接触面積の増加に伴い基本波、2 次高調波、基本波/2 次高調波振幅比の減少を確認した。

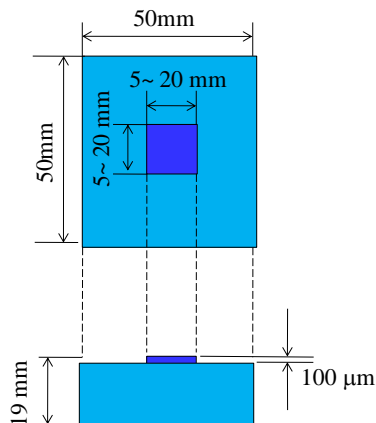
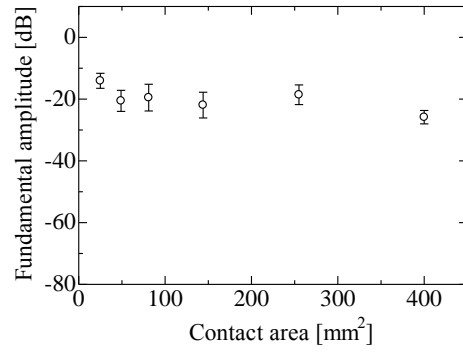
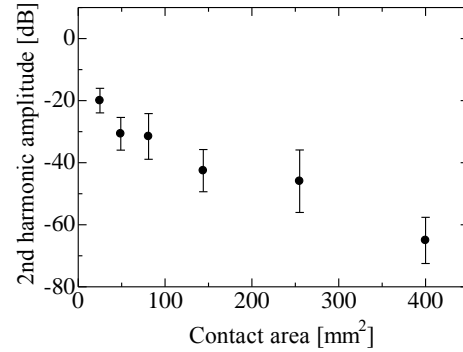


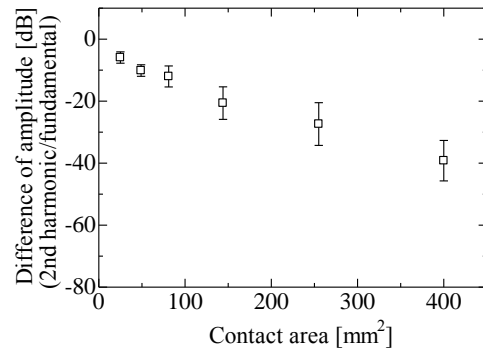
Fig.8 使用するガラス



(a) 接触面積-基本波特性



(b) 接触面積-2 次高調波特性



(c) 接触面積-2 次高調波/基本波振幅比特性

Fig.9 接触面積特性

(b)光の干渉による隙間の測定

固体材料同士の接触状態を確認する方法として光干渉法がある。Fig.10 のように曲率半径の大きい凸ガラスをガラス平板上へのせ、上部から光を入射させると、凸ガラスの底面からの反射光と、ガラス平板上からの反射光が干渉し Fig.11 のように同心の環状縞模様のニュートンリングが観測される。入射する光の波長を λ 、干渉縞の暗線の縞次数を N とすると Fig.12 の隙間幅 δ は(1)式で与えられる⁶⁾。

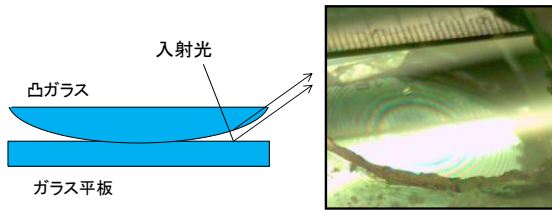


Fig.10 光干渉法原理図 Fig.11 ニュートンリング

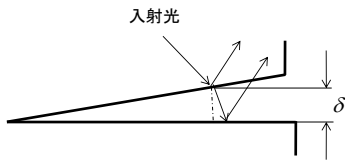


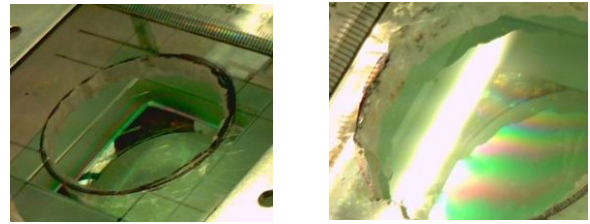
Fig.12 接触部の拡大図

$$\delta = \frac{\lambda}{2} N \quad (1)$$

このニュートンリングを観測することにより接触部分と隙間がある部分を確認することができる。

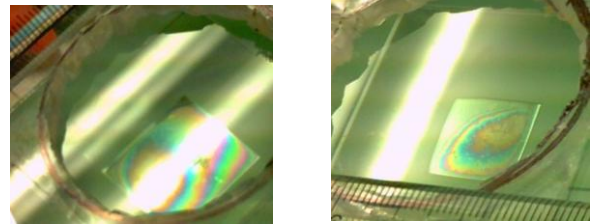
(c)光干渉法による接触境界面の確認

接触圧力 0.04 MPa, 接触面積は 50×50, 30×30, 20×20, 15×15 mm² とした場合の接触境界面の状態を確認した結果を Fig.13 に示す。Fig.13 より, 接触面積の減少に伴い, 実際に固体材料が接触している真実接触面積が増加することが確認できる。固体材料の真実接触面積は加重に比例し増えること, 真実接触面積は見かけの接触面積によらない¹⁰⁾ことがトライボロジーの分野では指摘されている。このことから接触面積を変化させても, 接触点の数はほとんど変化しないと考えられる。接触境界面には Fig.6 のような中心部の振動変位が最大となる振動が加わっているため, 接触面積を減少させることにより CAN に関する接触点が増加し, 効率よく CAN を発生することができると思われる。



(a) 50×50 mm²

(b) 30×30 mm²



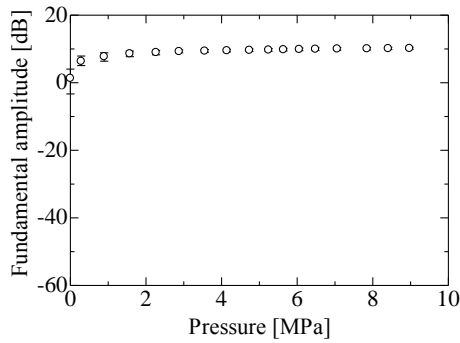
(c) 20×15 mm²

(d) 15×15 mm²

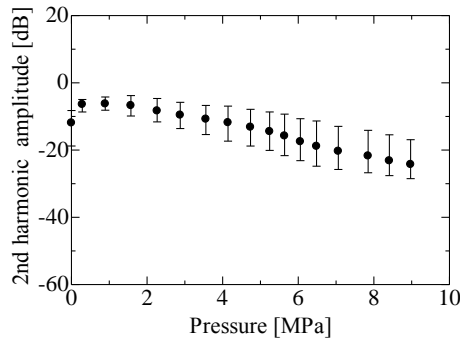
Fig.13 ニュートンリング観測結果

4-2 接触圧力に関する検討

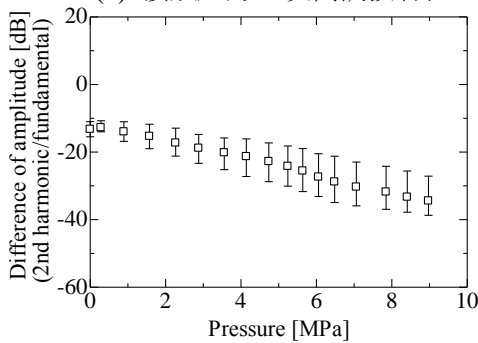
接触面積 9×9 mm² のガラスを使用し, 接触圧力 0~9 MPa と変化させ接触圧力に関する検討を行う。接触境界面に加わる振動変位は約 100 nm とし, 10 回測定を行う。測定結果を Fig.14 に示す。Fig.14 より接触圧力の増加に伴い基本波が増加する傾向を示し, 2 次高調波と 2 次高調波/基本波振幅比は接触圧力約 1 MPa で最大値をとり, 徐々に圧力の増加に伴い減少する傾向を示した。接触圧力約 1 MPa から基本波が飽和することから接触圧力の増加に伴い, 接触境界面の接触点が弾性変形や塑性変形のため真実接触面積が増加し¹⁰⁾, 接触圧力約 1 MPa で真実接触面積は見かけの接触面積に近い値となると考えられる。この真実接触面積が最大となる接触圧力以上となると, 接触境界面の接触振動が妨げられるようになるため CAN による 2 次高調波が減少すると考えられる。



(a) 接触圧力-基本波特性



(b) 接触圧力-2次高調波特性



(c) 接触圧力-2次高調波/基本波振幅比特性

Fig.14 接触圧力特性

4-3 表面粗さに関する検討

(a) 表面粗さのパラメータ¹¹⁾

本研究では、表面の粗さのパラメータとして一つの傷が測定値に与える影響が少なく、安定した値が得られる算術平均粗さ Ra を用いる。算術平均粗さ Ra は Fig.15 のように粗さの平均線 Z_{cp} からの絶対偏差の平均値として定義され、(2)式のように定義される。また、各種粒径の異なる研磨剤を使用し、ガラスの表面を研磨すると Fig.16 に示すように Ra は 2~90 nm の間で変化させることができる。

AFM により表面を画像化した結果を Fig.17 に示す。研磨剤の粒径を変化させることにより表面の粗さが変化することが確認できる。

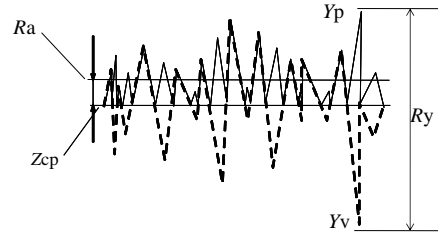


Fig.15 粗さのパラメータ

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_i |Z_i - Z_{cp}| \quad (2)$$

$$Ry = Yp + Yv \quad (3)$$

N : 面内の点数, Z_i : データ点

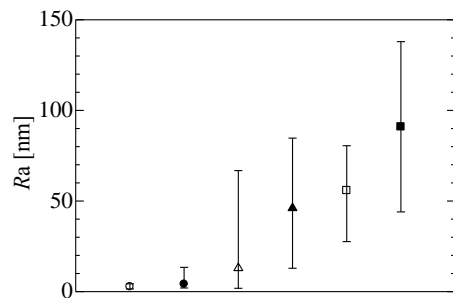
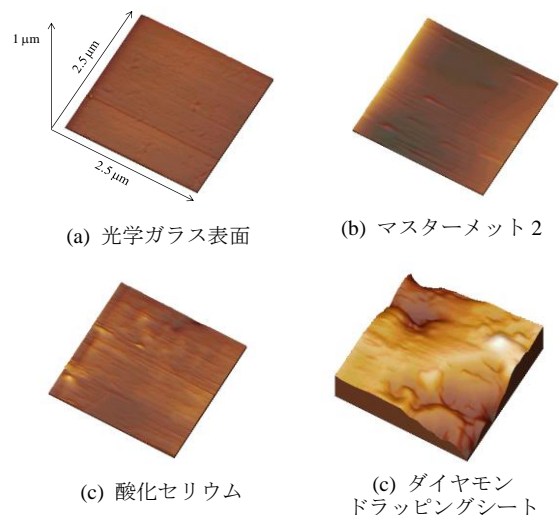


Fig.16 各研磨剤を使用した場合の算術平均粗さ

- : 光学ガラス表面
- : マスターメット 2
- △: 酸化セリウム
- ▲: ダイヤモンドドラッピングシート
- : 耐水研磨紙 P 4000
- : カーボラダム#2000



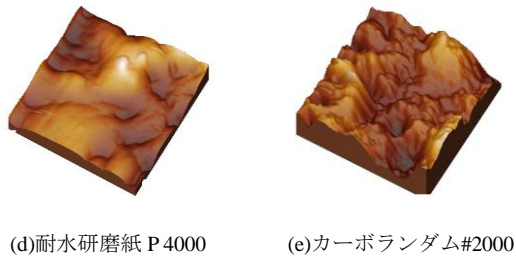
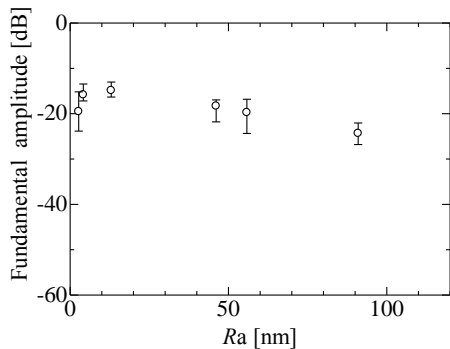


Fig.17 ガラス表面の AFM 画像

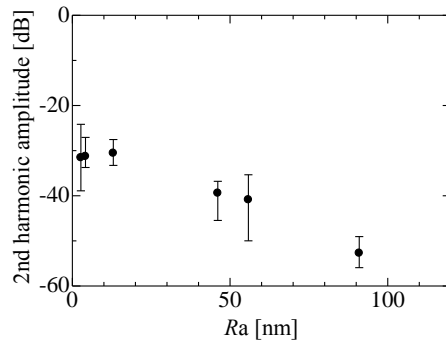
(b)表面粗さに関する特性

接触面積 $9 \times 9 \text{ mm}^2$ のガラスを使用し、接触圧力 0.04 MPa 一定とし、 $Ra=2.7\sim 90.9 \text{ nm}$ まで変化させ CAN の発生量について検討を行う。このとき接触境界面に加わる振動変位は約 100 nm とし、ガラスの接触状態を考慮し、 90° ずつ回転させ 20 回測定を行う。測定結果を Fig.18 に示す。Fig.18 より、表面粗さの増加により基本波、2 次高調波、2 次高調波/基本波振幅比の減少を確認した。この原因として真実接触面積の減少が考えられる。

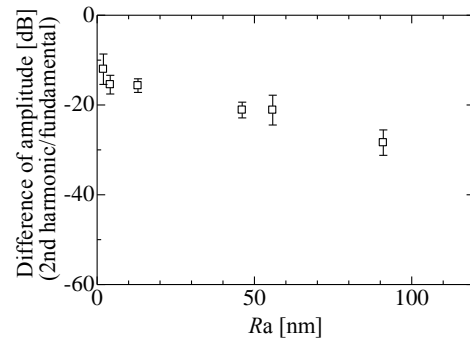
透明材料でない固体材料の真実接触面積を評価する方法として AFM による測定範囲と実際の測定により得られた表面積の面積比を用いる方法が考えられる。この面積比が 1 に近いほど材料同士を接触させた際の真実接触面積が見かけの接触面積に近い値となると考えられるためである。各 Ra による面積比の測定結果を Fig.19 に示す。Fig.19 より、 Ra の増加に伴い面積比の増加を確認できる。特に、 $Ra=2 \text{ nm}$ では面積比はほぼ 1 であり真実接触面積が見かけの接触面積に近い値である



(a) Ra-基本波特性



(b) Ra-2 次高調波特性



(c) Ra-2 次高調波/基本波振幅比特性

Fig.18 表面粗さ特性

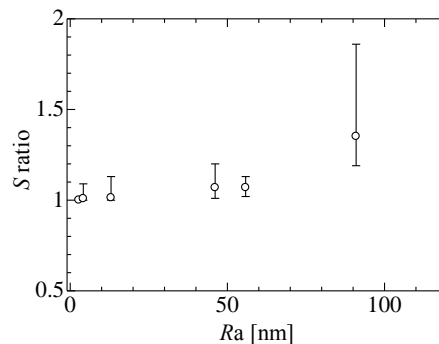


Fig.19 Ra-面積比特性

と予測される。 $Ra=90 \text{ nm}$ では 1.4 であり真実接触面積が減少すると考えられる。これらのことから表面粗さの増加に伴いガラス同士の真実接触面積が減少し、CAN の発生量が減少するものと考えられる。

5.真実接触面積に関する検討

(a) 接合層簡易モデルの作成

真実接触面積が異なる凸ガラスを使用し、真実接触面積の変化に伴う CAN による 2 次高調波の発生量の変化を検討する。Fig.20 に

真実接触面積の異なる3種類の凸ガラスを示す。その値はそれぞれ0.785, 19.6, 176.6 mm²である。真実接触面積を確認した後、隙間に水を注入することにより接合層における固体材料の接触部分を簡易モデルとして再現する。接合層の観測結果をFig.21に示す。Fig.21よりガラスの接触部分と水により満たされている部分が存在することが確認できる。

(b) 凸ガラスを用いた2次高調波検出実験

Fig.20, 21の各接触状態を確認した後に、約10~120 nmの振動変位を接触境界面に与え、2次高調波検出実験を行う。結果をFig.22, 23に示す。Fig.22, 23より真実接触面積の増加に伴いCANによる2次高調波が増加する傾向を確認することができる。

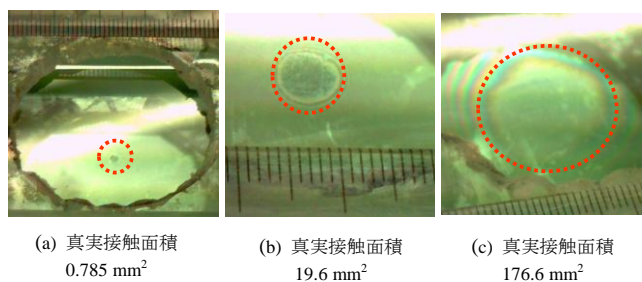


図20 接触境界面観測結果

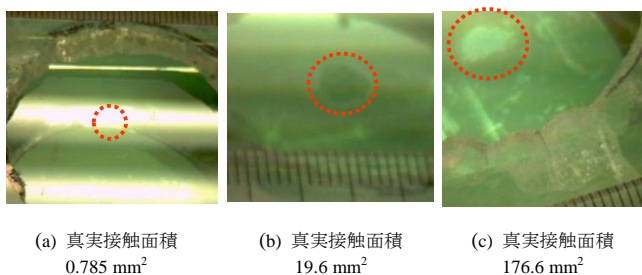
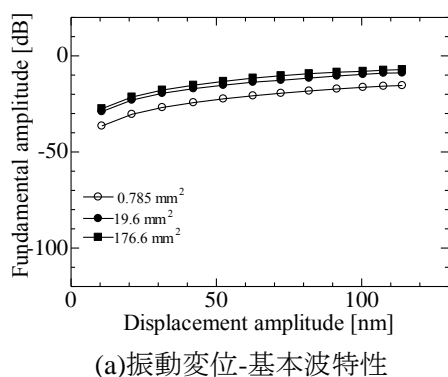
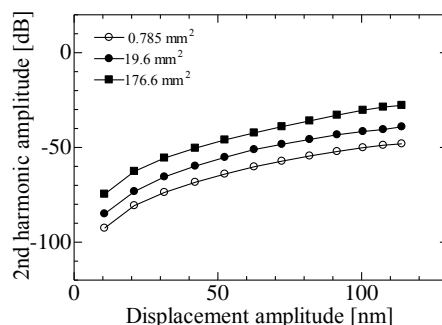


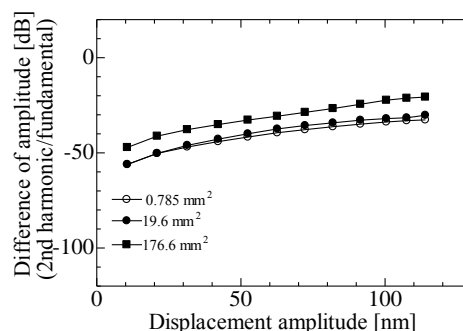
Fig.21 接合境界面観測結果



(a)振動変位-基本波特性

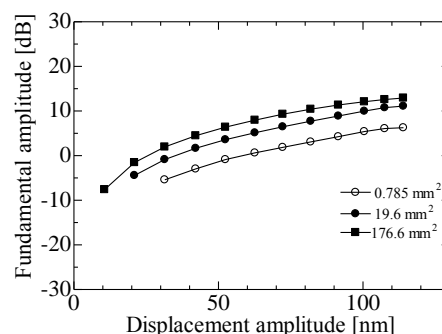


(b)振動変位-2次高調波特性

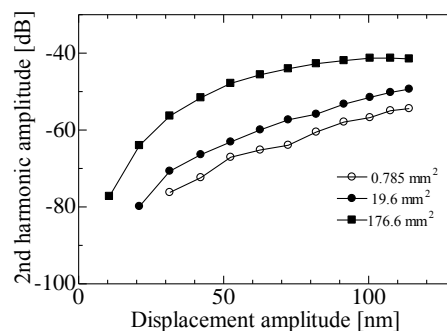


(c)振動変位-2次高調波/基本波振幅比特性

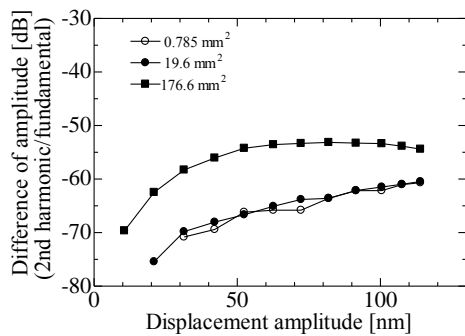
Fig.22 各真実接触面積における振動変位特性



(a)振動変位-基本波特性



(b)振動変位-2次高調波特性



(c)振動変位-
2次高調波/基本波振幅比特性

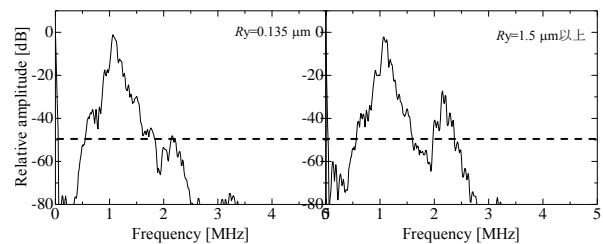
Fig.23 各接合状態における振動変位特性

6.接合境界面での2次高調波検出と低減法

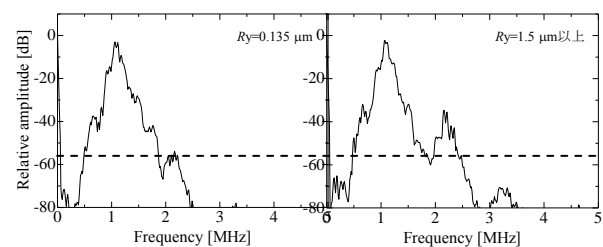
固体材料同士の間には水や油などの弾性流体が入り込んだ場合その厚さは、弾性流体潤滑理論によると約 $1\ \mu\text{m}$ 程度であるといわれている¹²⁾。このことから図8のようなガラスを万力により圧力を加え、隙間から弾性流体を入れた場合の接合層の厚さは約 $1\ \mu\text{m}$ 程度に制御できると考えられる。この接合層よりも固体材料の表面粗さが大きい場合、固体材料の接触が生じCANの発生原になる可能性が考えられる。そこで、この接合法を用いてFig.15に示すように、粗さの最大高低差((3)式)として定義される R_y を使用し、表面粗さが接合層の厚さよりも小さい $R_y=0.135\ \mu\text{m}$ 、接合層の厚さよりも大きい $1.5\ \mu\text{m}$ 以上とした場合(Fig.17(a), (e)に対応する)の接合境界面からの2次高調波検出を行う。検討する接合材料は水、サリチル酸フェニル(和光純薬工業社製)、厚さ $10\ \mu\text{m}$ の両面テープ(日東電工社製)を用いる。サリチル酸フェニルや水は従来法ではよく用いられる接合法であるが、表面粗さによる固体材料の接触がCANを発生させる可能性がある。一方一定の厚みのある両面テープを用いた場合、固体材料の接触を防ぐことができCANの発生量を低減させることができると考えられる。接触面積 $9\times 9\ \text{mm}^2$ のガラスを使用し、

万力により接触圧力 $3\ \text{MPa}$ を加え、隙間から水、サリチル酸フェニルを入れ接合を行う。厚さ $10\ \mu\text{m}$ の両面テープの場合は貼り付けた後に接触圧力 $3\ \text{MPa}$ を加える。このとき接触境界面に約 $100\ \text{nm}$ の振動変位を与え2次高調波検出実験を行う。

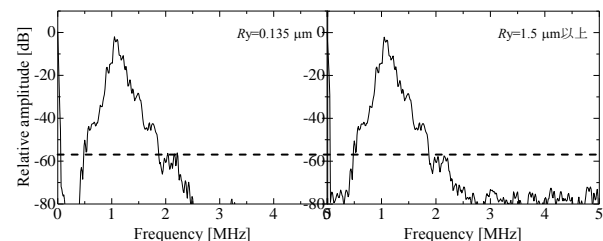
接触境界面がない連続体のガラスを基準に正規化したスペクトルの測定結果をFig.24, 25に示す。Fig.24より、水とサリチル酸フェニルを用いた場合では表面粗さの増加による2次高調波の増加を確認することができるが、両面テープを用いた場合では表面粗さの増加による2次高調波の増加を確認できない。また、Fig.25より、 $R_y=1.5\ \mu\text{m}$ 以上のガラスを接触させた状態から、接合方法を水、サリチル酸フェニル、両面テープとした順に2次高調波の発生量が減少することが確認できる。



(a) 水



(b) サリチル酸フェニル



(c) 厚さ $10\ \mu\text{m}$ 両面テープ

Fig.24 表面粗さの増加による2次高調波検出

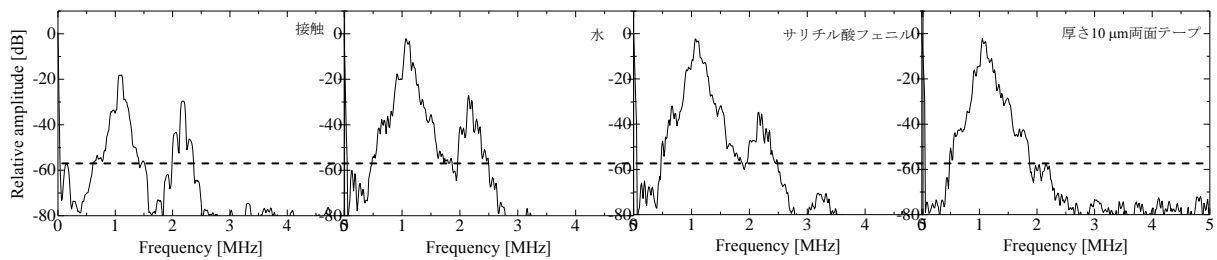


Fig.25 各接合方法の比較 ($R_y=1.5 \mu\text{m}$ 以上)

水とサリチル酸フェニルを用いた場合では表面粗さによる固体材料の接触が CAN を発生させたと考えられる。また両面テープを用いた場合には固体材料の接触を防ぐことができ CAN による 2 次高調波の発生量を最も減少させることができたと考えられる。

6.終わりに

本研究では、接合境界面の固体材料の接触境界面に着目し CAN の特性について検討を行った。接触境界面での接触面積、接触圧力、表面粗さ、凸ガラスを用いた実験より CAN による 2 次高調波は真実接触面積に依存することを示した。また、水とサリチル酸フェニルを用いて実際に固体材料を接合した際には表面粗さの増加により固体材料の接触が起き、CAN が発生することを示した。これらの結果から、表面粗さの低減や接合方法により固体材料の接触を防ぐことで CAN の発生量を低減させることができることを示した。

今後の課題として、接合層に存在する微小隙間の有無による 2 次高調波検出実験について検討を行う必要があると考えられる。

《参考文献》

- 1) 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)
- 2) 川嶋紘一郎: “超音波による閉じた亀裂検査”, 検査技術, 第 15 巻, 6 号, pp.32-40(2010)
- 3) 武藤梓, 今野和彦: “有限振幅超音波を用いた閉口クラックからの 2 次高調波の検出” 素材物性学雑誌, 第 20 巻, 1 号, pp.12-18 (2007)
- 4) Makoto Fukuda, Morimasa Nishihira and Kazuhiko Imano: “Novel Detection Using Double-Layered Piezoelectric Transducer in same Polarization Direction for sub-Harmonic Components Generated from Plastic-Deformed Metal Rod”, Japanese Journal of Physics, Vol.47, No.5, pp.3899-3903(2008)
- 5) 琵琶志朗: “固体接触面の非線形力学特性と高調波発生挙動”, 非破壊検査, 第 56 巻, 6 号, pp.297-302(2007)
- 6) I.Yu.Solodov, : “Nonlinear NDE Using Contact Acoustic Nonlinearity(CAN) ”, IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, pp.1279-1238(1994)
- 7) Q.Ma, Y.Ma, X.Gong, and D.Zhang : “Improvement of Tissue Harmonic Imaging Using the Pulse-Inversion Technique ”, Ultrasound in Med. & Biol., Vol.31, No.7, pp.889-894(2005)
- 8) 水沼浩: “接着大百科”, 朝倉書店(1993)
- 9) M.Born and E.Wolf: “Principles of Optics”, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, pp.318(1999)
- 10) 村木正芳: “図解 トライボロジー 摩擦の加科学と潤滑技術”, 日刊工業新聞社, pp.11-33(2007)
- 11) 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” (2001)
- 12) 渡辺孝一: “トライボロジー入門”, 株式会社不二越(2005)