

研究論文

超音波計測時の固体接触部からの高調波発生に関する実験的検討

今野和彦*, 石塚直樹*

Experimental Study of Harmonic Component Generation from the Contact of Solids in Ultrasonic Instrumentation

Kazuhiko IMANO[†] and Naoki ISHIZUKA[†]

Generation properties of second harmonic component for the infinite amplitude ultrasonic wave originated from the contact between solids by CAN (contact acoustic non-linearity) are examined. Effect of generation for the harmonic component for area, pressure and surface roughness of the solid contact are systematically experimented using glass blocks to clarify the properties of CAN. From the experiments using large amplitude 1 MHz ultrasonic burst sine wave, the second harmonic component of 2 MHz generated by CAN which depends on the true contact area of the solid contact is clarified. Surface roughness of solid contact which becomes important factor for generating CAN is also examined.

Thick adhesive layer introduced between solids surface is effective to reduce the generation of CAN is newly suggested.

Key Words : ultrasonic wave, second harmonic component, CAN, true contact area, surface roughness, thick layer

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, 基本波に比べて特異な性質を持つ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, サイドロープ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, ある音圧以上で亀裂面同士が衝突する場合と, 亀裂面が開口し, その後接触境界面が衝突や接触, 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⁾。これらの方法は従来の線形領域の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を含む超音波探触子は内部がバックinggや音響レンズ, 圧電振動子, 音響整合層等の固体物質が層状に接合された積層構造となっており探触子内部に固体の接合層を複数持っている

おり CAN の発生源となる可能性がある。また超音波探傷において多点測定を行う場合には, 探触子と測定対象物との接合層が同様に CAN の発生源となる可能性があり高調波を計測する場合には影響を及ぼすと考えられる。従来の線形計測においては探触子と固体試料表面における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 μm 程度の平均粗さを持つことが知られており⁸⁾, これらが接触する接合面では, 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に存在する気泡, 汚損物質, 酸化や加工に伴う変質層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合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 が媒質中の弾性的な非線形によって生じる波形ひずみに由来する高調波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も考えられる。これらのことより, 有限振幅超音波すなわち大振幅の超音波を用いた探傷を行う場合には接合層や固体の接合面の影響は無視できなくなると考えられる。

本研究では, 固体材料の接合面の接触点に着目し, CAN による 2 次高調波に及ぼす接触面積, 接触圧力, 表面粗さの影響を検討する。ガラスブロックを用いて, 実際の接合境界面での CAN による 2 次高調波の特性とその低減法について検討を行う。なお, 光学的に真実接触面積の大きさを検討するために透明体であるガラスを試料として用いている。

平成23年7月13日受付;平成23年10月6日受理

* 秋田大学大学院 工学資源学研究所 電気電子工学専攻
〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

† Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Akita University 1-1 Tagata-gakuenmachi, Akita, 010-8502, Japan
E-mail : imano@gipc.akita-u.ac.jp

2. 高調波の発生原理

2-1 CANによる高調波発生原理

固体内の亀裂にはFigure 1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閉口亀裂 ($\delta_1=0$)、入射音波の振幅 A 以下の開口幅 ($\delta_2 < \delta_3 < A$) をもつ亀裂、入射音波の振幅 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)) なる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、亀裂部分が接触あるいは衝突振動を繰り返す。また、固体材料が接触している閉口亀裂部分 ($\delta_1=0$) においては、超音波による引張り応力により亀裂部分が開口する。したがって引張相の音波は亀裂面を引き離そうとするため音波は亀裂面を越えて透過せずに亀裂面で反射する。一方、亀裂部分は圧縮相の音波により亀裂面が閉口するため圧縮相の音波は亀裂を越えて透過する。そのため亀裂に入射する音波の透過波と反射波はFigure 3に示すように半波整流されたようなひずみ波形となりその結果、高調波成分として観測される。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、応力-ひずみ特性が非線形性を示すが、CANの場合の方が波形が大きくひずむため、非線形連続体に大振幅超音波を入射した場合と比

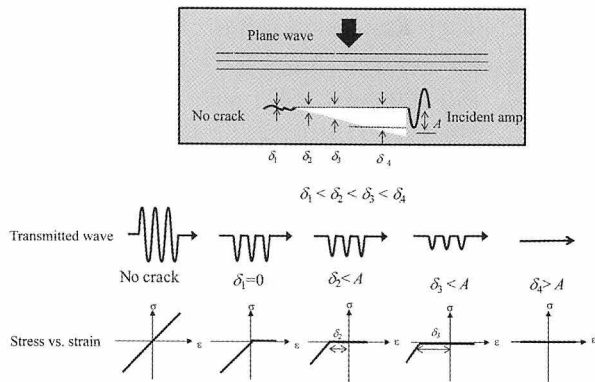


Figure 1 Relation of stress-strain properties and ultrasonic wave transmission at the various cracks.

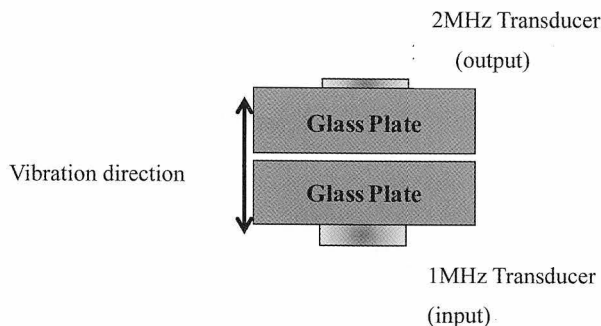


Figure 2 Model of contact surface of solids

較し、著しく大きな高調波を発生することになる^{1,2)}。

3. 2次高調波測定システム

検討モデルとして、Figure 2に示すように光学研磨されたガラス面に圧電振動子をサロールを用いて接合し、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Figure 3に示す。まず、CANは接触境界面に加わる振動変位に密接に関係しているためFigure 3(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Figure 4のように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Figure 5より、電圧を制御することで振動変位が約10~140nmまで変化することが確認できる。

次に測定システムFigure 3(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1MHzのバースト正弦波電圧10波を発振し、これを高周波増幅器(Thamway T145-4715B)により増幅し、駆動電圧に含まれる基本周波数成分以外の高調波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0.7~1.7MHz)を通し、整合器(Thamway T020-4734A)により整合をとり1MHzの振動子を駆動する。受波側には2MHzの振動子を使用し、接触境界面

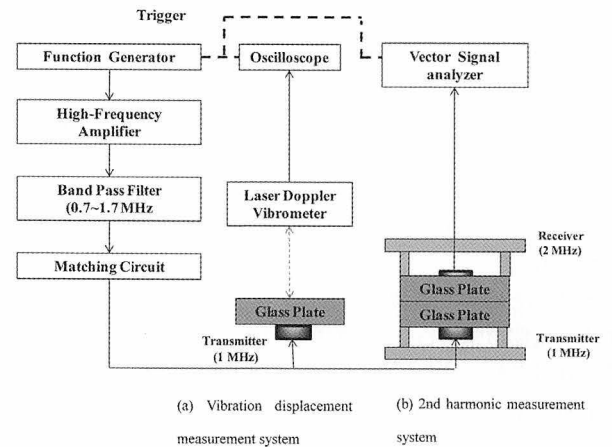


Figure 3 Measurement system

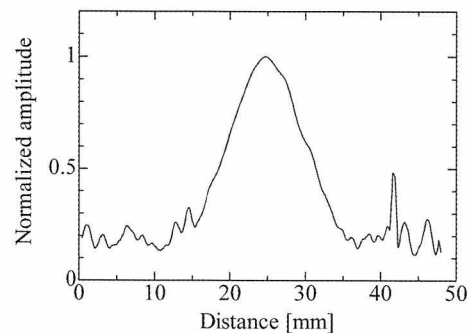


Figure 4 Distribution of velocity amplitude on the glass surface

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) によりリアルタイム観測する。このときのベクトルシグナルアナライザの設定は波形の取得ゲート幅すなわち波形の切り取り幅を80 μs 、内部フィルタを0~5 MHzとし、切り取ったデータにはハニング窓をかけスペクトルの観測を行う。

なお、使用した圧電振動子は1 MHz、2 MHz共に直径10 mmの円板型チタン酸鉛製セラミックスである。

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

Figure 6 に示すように50×50 mm²のガラスの周りをカーボランダムにより高さを約100 μm 程度になるように正方形に研磨し、接触面積 S_a を5×5~20×20 mm²まで変化させ、接触面積 S_a 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、ガラスの接触状態を変化させるため90°ずつ回転させ20回の測定を行う。なお、接触圧力はガラスの50×50 mm²の面 (凸部を有する面の裏面側、以後加圧面とよぶ: 面積 $2.5 \times 10^3 \text{ m}^2$) に荷重を加えており、この荷重を変化させることによって凸部の接触面の

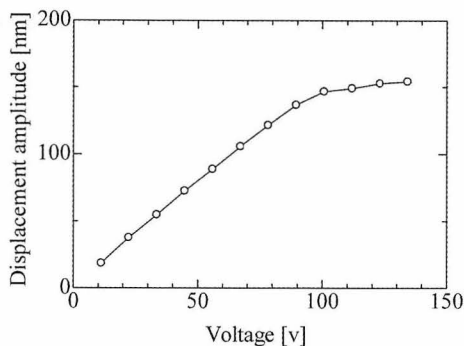


Figure 5 Displacement of glass surface versus excitation voltage

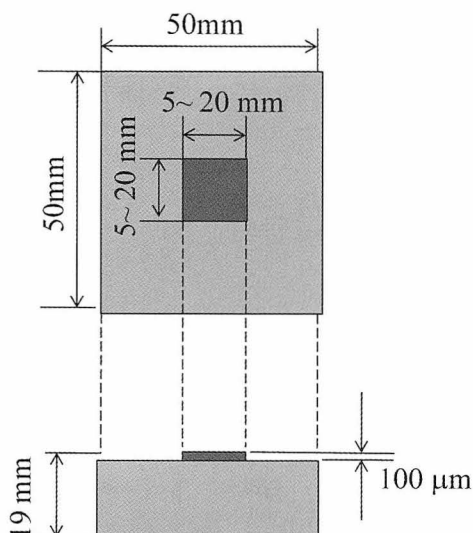


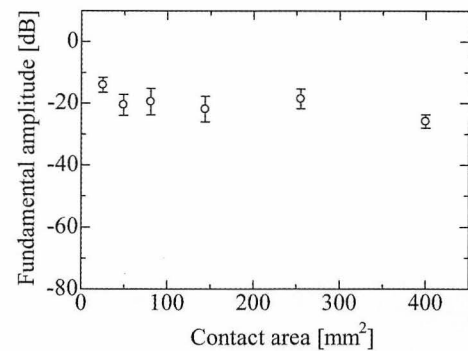
Figure 6 Geometries of glass block used in the experiments

圧力を変化させている。実験では荷重を10.2 kgとして、加圧面の圧力が0.04 MPa一定となるようにしている。

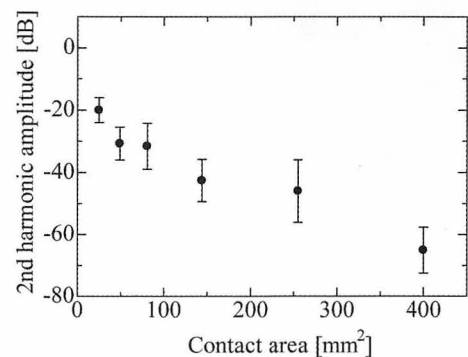
測定結果をFigure 7に示す。Figure 7より、接触面積 S_a の増加に伴い基本波、2次高調波および基本波と2次高調波の振幅比のいずれの値もの減少することがわかる。なお、図の縦軸は厚さ40 mmの連続体のガラスの場合を基準として示している。以後本論文で述べる基本波、2次高調波のレベルも全て同様である。

(b) 光の干渉による隙間の測定

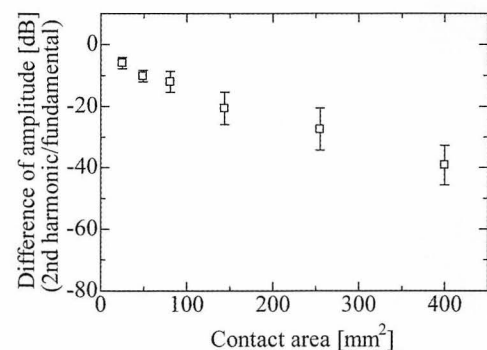
固体材料同士の接触状態を確認する方法として光干渉法がある。本論文では凸ガラスと平板ガラスの組み合わせによって生ずるFigure 8のようなニュートンリングを用いて接触状態を



(a) Property of contact area – fundamental wave amplitude



(b) Property of contact area – second harmonic wave amplitude



(c) property of contact area – 2nd harmonic amp./fundamental amp.

Figure 7 Property of contact area vs. fundamental and second harmonic wave amplitude

観測した。入射する光の波長を $\lambda (=580\text{ nm})$ 、干渉縞の暗線の縞次数を N とすると両方のガラスの間隔幅 $\delta = \lambda/2 \cdot N$ となる⁶⁾。

(c) 光干渉法による接触境界面の確認

接触面積を Figure 6 のように 50×50 , 30×30 , 20×20 , $15 \times 15\text{ mm}^2$ とし、加圧面圧力を 0.04 MPa とした場合の接触境界面の状態を確認した結果を Figure 9 に示す。Figure 9 より、接触面積 S_a の減少に伴い真実接触面積 S_r ¹⁰⁾ が増加する様子がわかる。固体材料の真実接触面積 S_r 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 S_a によらないことがトライボロジーの分野では指摘されている¹⁰⁾。このことから接触面積 S_a 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。この実験の場合、接触境界面には Figure 4 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おり、接触面積 S_a の減少により中心部での圧力の増加にともなって圧力の増加により、CAN に関与する接触点が増加するため CAN が発生しやすくなると考えられる。

4-2 接触圧力に関する検討

接触面積 S_a が $9 \times 9\text{ mm}^2$ のガラスを使用し、加圧面圧力を 0

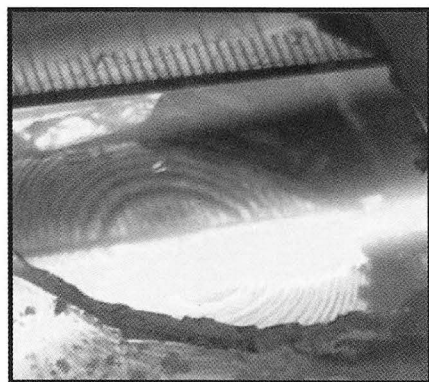
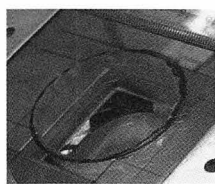


Figure 8 Newton's rings observed on the glass plate



(a) $50 \times 50\text{ mm}^2$



(b) $30 \times 30\text{ mm}^2$



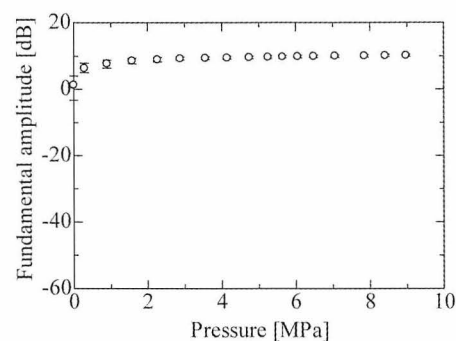
(c) $20 \times 15\text{ mm}^2$



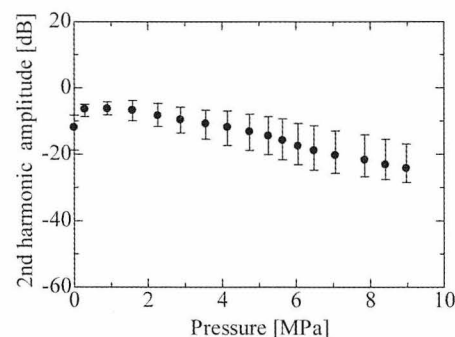
(d) $15 \times 15\text{ mm}^2$

Figure 9 Examples of Newton's rings for various S_r

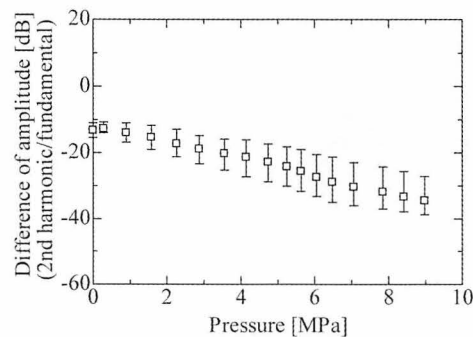
~ 9 MPa と変化させ接触圧力に関する検討を行う。接触境界面に加わる振動変位は振動子駆動電圧を調整して約 100 nm とし、10回測定を行う。測定結果を Figure 10 に示す。Figure 10 より接触圧力の増加に伴い基本波が増加する傾向を示し、2次高調波と2次高調波/基本波振幅比は接触圧力約 1 MPa で最大値をとり、圧力の増加に伴い徐々に減少する傾向を示している。接触圧力が 1 MPa 付近から基本波が飽和することから接触圧力の増加に伴い、接触境界面の接触点が弾性変形や塑性変形のため真実接触面積 S_r が増加し¹⁰⁾、接触圧力約 1 MPa で真実接触面積 S_r は見かけの接触面積 S_a 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



(a) Property of pressure of contact - fundamental wave amplitude



(b) Property of pressure of contact - 2nd harmonic wave amplitude



(c) Property of pressure of contact - 2nd harmonic wave amp./fundamental wave amp.

Figure 10 Property of pressure contact vs. harmonic wave amplitude

触境界面での超音波の音圧による圧力よりも大きくなるため接触振動が抑え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。すなわち、外部圧力により接触部の振動が抑制されるものと考えられる。

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

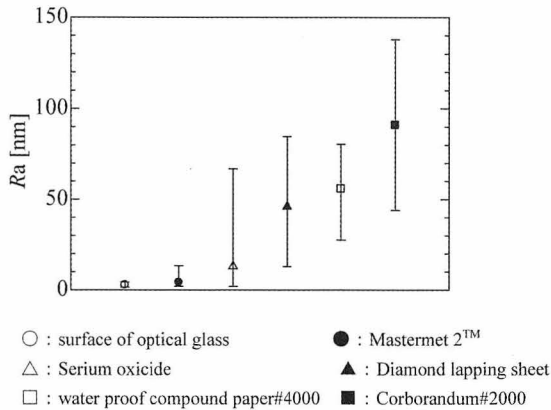


Figure 11 Average surface roughness for various compounds

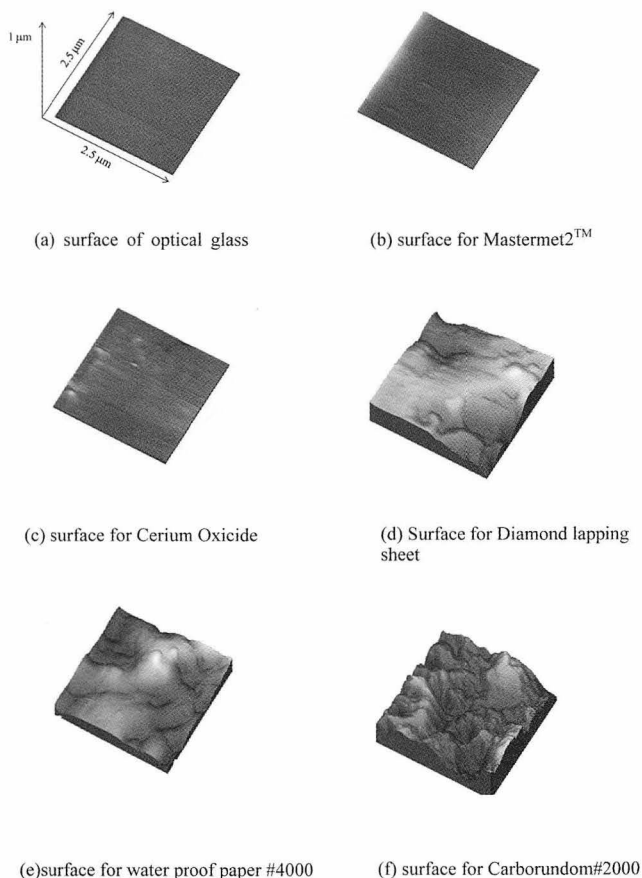


Figure 12 AFM images for glass surfaces

Ra および粗さの最大高低差 Ry を粗さのパラメータとして用いる。

実験に用いるガラス板には各種粒径の異なる研磨剤を使用し、ガラスの表面の研磨を行ってFigure 11に示すように Ra を2~90 nmの間で変化させている。

AFMにより表面の凹凸を画像化した結果をFigure 12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。

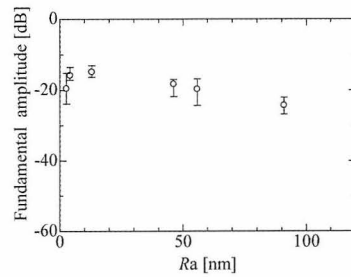
(b) 表面粗さに関する特性

接触面積 Sa が $9 \times 9 \text{ mm}^2$ 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変化させるために、90°ずつ回転させ20回の測定を行う。測定結果をFigure 13に示す。Figure 13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。この原因としては真実接触面積 Sr の減少が考えられる。

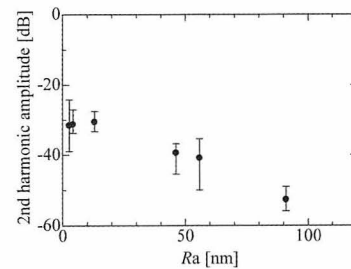
4-4. 真実接触面積に関する検討

凸ガラスを用いた2次高調波検出実験

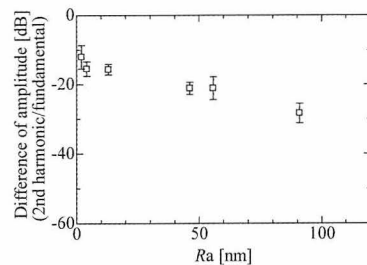
Figure 14の各接触状態を確認した後に、約10~120 nmの振



(a) Ra-fundamental wave amplitude



(b) Ra-2nd harmonic wave amplitude



(c) Ra-2nd harmonic amp/fundamental amp

Figure 13 Property of harmonic wave vs. surface roughness

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Figure 15に示す。この結果から、真実接触面積 S_r 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

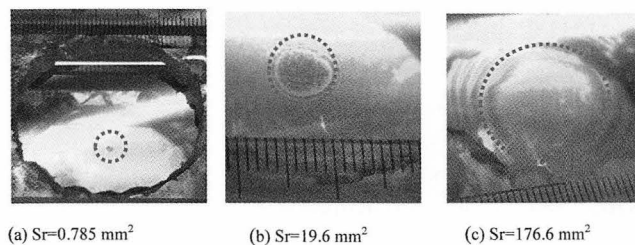
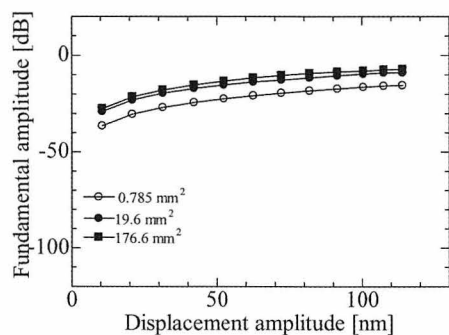
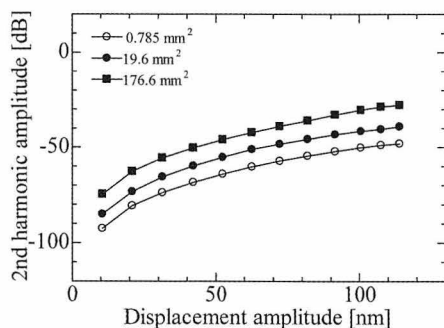


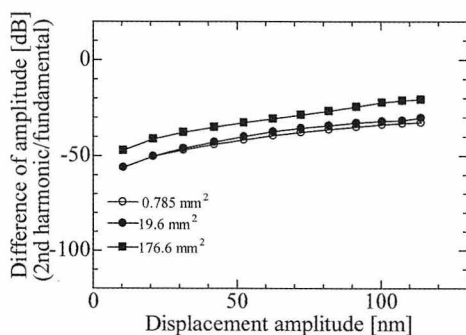
Figure 14 Observation results for various contacts



(a) Vibration displacement-fundamental wave amplitude



(b) Vibration displacement - 2nd harmonic wave amplitude



(c) Vibration displacement - 2nd harmonic wave amp./ fundamental wave amplitude

Figure 15 Property of vibration for various real contact areas S_r

できる。

5. 接合境界面での2次高調波検出とCANの抑制法

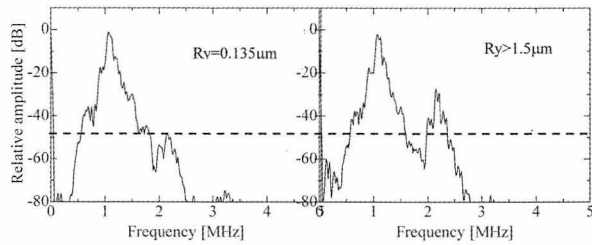
固体材料同士の間に水や油などの弾性流体が入り込んだ場合、その厚さは弾性流体潤滑理論によれば約 $1\mu\text{m}$ 程度であるといわれている¹²⁾。このことからFigure 6のようなガラスを万力によって圧力を加え、隙間から弾性流体を入れた場合の接合層の厚さは約 $1\mu\text{m}$ 程度に制御できると考えられる。この接合層よりも固体材料の表面粗さが大きい場合、固体材料の接触が生じCANの発生源になる可能性が考えられる。そこで、この接合法を用いて粗さの最大高低差 R_y を用いて、表面粗さが接合層の厚さよりも小さい $R_y = 0.135\mu\text{m}$ 、接合層の厚さよりも大きい $1.5\mu\text{m}$ 以上とした場合 (Figure 12(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および室温では固体であり 43°C 付近で液体化する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の非破壊検査ではよく用いられる接合媒質であるが、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、固体材料面の直接の接触を防ぐことができCANの発生を抑制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を 3MPa とし、隙間から水、サリチル酸フェニルを導入し接合を行う。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 3MPa を加える。このとき接触境界面に約 100nm 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基本波 (1MHz)で正規化したスペクトルの測定結果をFigure 16に示す。図中の波線は R_y の大小による2次高調波の比較のために示したものであり、 $R_y = 0.135\mu\text{m}$ のときのレベルを示している。

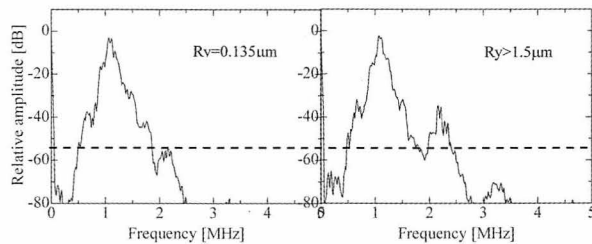
Figure 16より、水とサリチル酸フェニルを用いた場合では表面粗さの増加による2次高調波の増加を確認することができるが、両面テープを用いた場合では表面粗さの増加による2次高調波の増加は確認しないことがわかる。

また、同図より、 $R_y = 1.5\mu\text{m}$ 以上では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。

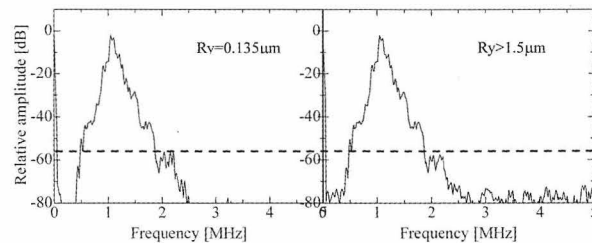
水とサリチル酸フェニルを用いた場合では表面粗さによる固体材料の接触がCANを発生させる原因となっていると考えられる。また両面テープを用いた場合ではテープの厚さにより固体材料の接触部の直接の接触 (衝突)を防ぐことができ 1MHz の基本波の音波の透過を妨げることなくCANによる2次高調波の発生量のみ減少させることができたと考えられる。



(a) Water



(b) Salicylic phenyl

(c) Adhesive tape of 10 μm thicknessFigure 16 Detection of 2nd harmonic wave for thick contact layer (dotted lines show the level of $R_y = 0.135 \mu\text{m}$)

6. おわりに

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、面積の異なる凸部を持つ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 S_r 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、入射音波の振動振幅（ $\sim 110 \text{ nm}$ ）よりも大きな厚さ（ $10 \mu\text{m}$ ）

をもつ両面テープのような層を入れることにより表面粗さの影響の低減や、接合面の分離により固体材料の直接の接触を防ぐことができ、その結果音波の透過を妨げずにCANの発生量を低減させることができることを示した。

本論文では詳述していないが今後、入射する音波の基本波レベルを変化させていったときの接触面積、接触圧力、表面粗さ、面積に対する2次高調波の変化の特性を実験的に明らかにし非破壊試験の際の最適な音波のパワーレベルや振動変位などを明らかにしていきたいと考えている。

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) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: “Novel Detection Using Double-Layered Piezoelectric Transducer in same Polarization Direction for sub-Harmonic Components Generated from Plastic-Deformed Metal Rod”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 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 Ultrasonic 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—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”, Nachi-Business News, vol.7, D1, pp.1-7 (2005)