

## 圧電振動子—固体媒質接着部における接触型非線形超音波 に関する検討

### Consideration of Contact Acoustic Nonlinearity of a bonded surface between piezoelectric transducer and solid material

○川上淳平\*, 今野 和彦\*  
○ Jumpei Kawakami\*, Kazuhiko Imano\*

\*秋田大学 工学資源学部  
\*Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード：高調波(Harmonic), 接触型非線形超音波(Contact Acoustic Nonlinearity),  
接着層(Bonding Layer), 固体材料(Solid Material)

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科  
川上淳平, Tel : (018)889-2494, Fax : (018)837-0406, E-mail : m9007115@wm.akita-u.ac.jp

#### 1.はじめに

近年, 主に超音波探傷の分野において接触型非線形超音波を用いた計測手法が着目されている<sup>1)~5)</sup>. 接触型非線形超音波とは, 従来の媒質の非線形性によるものとは発生機構が異なる非線形超音波である. nm オーダーの隙間を持つ連続体や接触界面, 弱構造体または引張と圧縮で異なる特性を持つ界面に対し大振幅バースト波を入射すると, ある音圧以上で隙間が開口し, その後接触界面が接触, 分離を繰り返しながら振動する, その結果従来の連続弾性体における非線形現象と比較し, 桁違いに大きい非線形超音波(高調波)が励起される.

この接触型非線形超音波の利用として, 閉口き裂の超音波探傷が存在する. 閉口亀裂とは開口幅が数 nm のき裂であり, 今後重大な欠陥に発展する可能性を持ち, 早期発見が望まれているが, き裂が閉口し, 内部では音響特性インピーダンスの差が存在しないため従来の線形超音波法(パルスエコー法)では明瞭な反射波が得られないといった問題が存在する. しかし, 閉口亀裂に有限振幅音波を送波しき裂を開口させることで接触型非線形超音波が発生し, これにより発生した高調波をき裂を透過した波形の周波数スペクトルから測定することで閉口亀裂の検出が可能であることが近年の研究で示されている.

しかし以上のような測定においては探触子-測定媒質間の接着層の影響が問題となる可能性がある。接着層は構造的長により、不完全な接着状態では内部に局所的に健全接合部やキッキングボンドと呼ばれる結合力のない密着した不完全接合部が存在する。この時、キッキングボンドからは接触型非線形超音波が発生し、高調波が発生してしまうと考えられる。

つまり接着層から発生する高調波はき裂より得られる情報ではないが、両者は重畳して観測されるため、高調波を用いる計測において接着層の影響は無視できなくなる。しかし、必ずしもすべての研究において探触子-試料間の接着層において発生する高調波を考慮しているわけではないという問題がある。

そこで本研究では2枚のガラス板を用い探触子-試料間の接着層を模擬した接着層から発生する接触型非線形超音波の観測を行う。

## 2.接着層,き裂における高調波の発生原理<sup>5)</sup>

接着層やき裂といった内部に隙間の存在する構造体における高調波の発生原理をFig.1の構造体の接触界面のモデル図により図解する。

試料の上部より平面波が入射したとき、接着、裂界面の応力ひずみ特性は、接合状態により変化し、さらに入射波振幅  $A$ 、隙間の幅  $d(\delta_1 > \delta_2 > \delta_3)$  をパラメータとして変化するため、以下の4通りの状態に分類することができる。

### (a)隙間なし(連続体)

応力とひずみの関係が線形な関係となり、入射波と同形状の波形が試料内を伝搬していく。

### (b)入射波振幅 $A \ll$ 隙間幅 $\delta_1$

入射波の変位が応力として試料下部に伝搬していかないため、図のような応力歪み特性となる。

### (c)入射波振幅 $A >$ 隙間幅 $\delta_2$

圧縮相において固体媒質と接着層が衝突を起し、その後圧縮相の波の一部が接着層内部に伝搬する。一方引張相の波は接着層内部には伝搬しないことからこの界面を伝搬する超音波は入射波形の一部を切り取ったような歪み波形となる。

### (d) 入射波振幅 $A \gg$ 隙間幅 $\delta_3$

圧縮相の波の一部が透過するが、(c)の条件に比べ、接触量が多く半波整流に近い波形が伝搬する。

以上の4つの条件の中で(c)、(d)の条件下において透過波形が歪みを生じることから、その周波数スペクトルには非常に多くの高調波が含まれることになる。

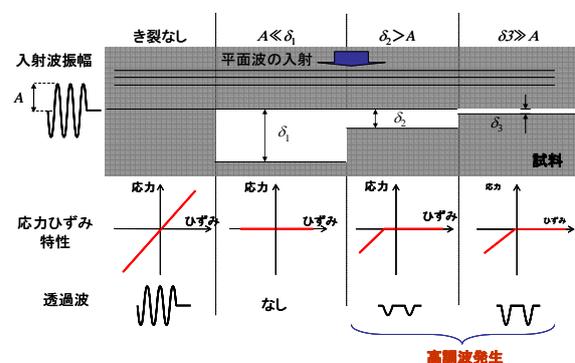


Fig.1 接触界面のモデル図及び応力ひずみ特性と透過波

### 3.接着層から発生する高調波の検出

#### 3-1 固体材料の選定

本研究では非接触で測定が可能であるため、接着層の影響を考えずに測定可能、方位分解能が高いため微小区間を測定可能といった利点を持つことからレーザドップラ振動計を超音波の受波に用いる。そのため、接着層作成に使用する固体材料として白色光学ガラス板(ケニス 長形ガラス)を用いる。この白色光学ガラスはレーザ光の光路観測などにおいて用いられておりレーザ光の反射・屈折が生じるためレーザドップラ振動計を用いた測定が可能であり、接着層の状態が目視可能であるという利点がある。

用意した2枚のガラス板の寸法および質量を **Table.1** に示す。厚さ、長手方向及び幅方向の長さはマイクロメータはマイクロメータ(Mitutoyo APB-1D, Mitutoyo APB-4D)を用いて測定し、質量は電子天秤(SHIMAZU BL-120H)を用いて測定した。

**Table.1** より、2つのガラスはほぼ同形状となっていることが確認できる。

**Table.1** ガラス板の寸法・質量

	ガラスA	ガラスB	
厚さ	15.2	15.1	mm
長さ(長手方向)	31.9	31.9	mm
長さ(幅方向)	16.9	17.7	mm
質量	0.104	0.106	kg

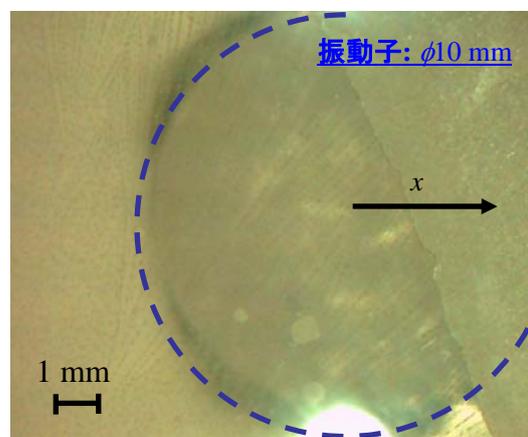
#### 3-2 ガラスの接着および接着層の観測

次に、この2枚のガラス板の接着面をカーボランダム(マルトー C2000)を用いて研磨

し、固形の結合剤(和光純薬工業株式会社製 サリチル酸フェニル)を用いて脱着を繰り返して、不完全接合部分が生じるように接着した。さらに超音波を送波する圧電振動子をサリチル酸フェニルを用いて不完全接合が生じないように強く接着した。

デジタル顕微鏡(Dino lite-Digital Microscope AM-311)を用いて撮影したガラス間の接着層の拡大図を **Fig.2** に示す。撮影は振動子が接着してある面の背面から行っている。

この時、振動子の上部で接着状態が異なっている点が存在することが確認できる。そこで振動子中心点から  $x$  方向にレーザ光を走査しながら測定を行うことで接着状態に対する高調波発生量の評価を行う。走査範囲は約 3 mm(0.5 mm 間隔)とする。



**Fig.2** ガラス接着面の拡大図

#### 3-3 測定システム

測定システムを **Fig.3** に示す。

発振器(Agilent HP 33120)をバースト正弦波 30 波で駆動し、高周波増幅器を用いて電力を 1 W まで増幅する。さらに駆動波形に生じ

る高調波を減衰させるため通過帯域 0.7 MHz~1.7 MHz のバンドパスフィルタ (DF 717BPF)を介して振動子を駆動する。また、使用する振動子は共振周波数 1 MHz の折り返し電極型チタン酸鉛系圧電振動子を用いる。さらにガラス端面の振動変位をレーザドップラ振動計(グラフテック AT0023,AT3700)を用いて非接触で測定する。オシロスコープ (Agilent Infinium 54845A)上で観測した振動変位波形のデータを PC に取り込み, FFT を行い周波数スペクトルから基本波と 2 次高調波の振幅差  $A_{dif}$  を算出した。ガラスが 2 枚の場合およびガラスが 1 枚の場合(ガラス間の接着層が存在しない)の結果を Fig.4 に示す。

その結果振動子中心より  $x$  方向に進むにつれて  $A_{dif}$  の値が向上していくことが確認でき, 振動子中心( $x=0$ )と  $x=2000 \mu\text{m}$  の点では基本波の 2 次高調波の振幅差が 10 dB 以上詰まっている。そのため  $x=2000 \mu\text{m}$  以降の点において接触型非線形超音波に起因すると考えられる 2 次高調波が発生している可能性が示された。またガラス間の接着層が存在しない場合の結果についても  $A_{dif}$  の値が変動している理由としては, 振動子とガラス間の接着層の影響が考えられ, 振動子の表面形状の荒さが影響していると考えられる。

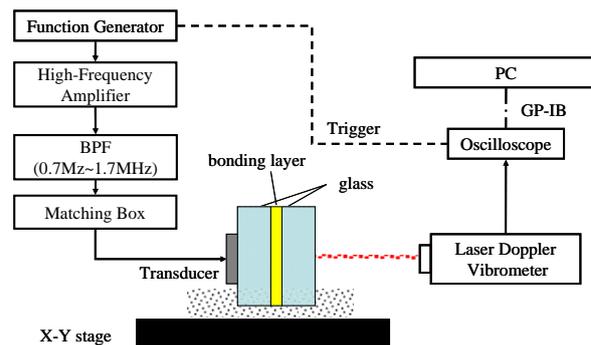


Fig.3 測定システム

○ without bonding layer ● with bonding layer

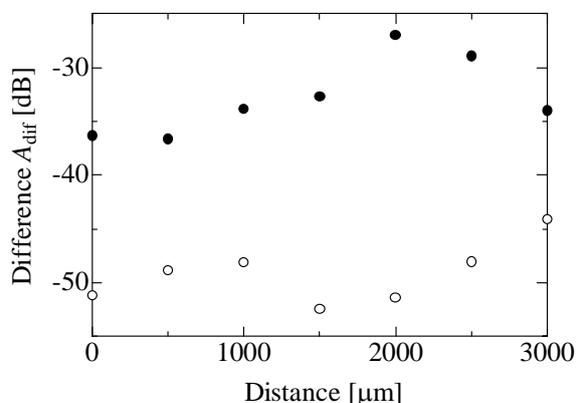


Fig.4 振動変位波形および周波数スペクトル

#### 4.接触面の振動変位 $A$ と発生する高調波量の検討

3-3 の結果より, ガラス間の接着層において, 基本波に対する 2 次高調波振幅  $A_{dif}$  が向上する点が存在することが示された。しかしこの高調波発生が接触型非線形超音波によるものであるかを確認する必要がある。

接触型非線形超音波は接触界面の振動振幅  $A$  と界面に存在する微小隙間  $d$  をパラメータとして発生する (Fig.1)。そのため振動変位  $A$  が徐々に大きくなっていった場合の  $A_{dif}$  の測定を行うことで, 隙間幅の推定や接触型非線形

超音波の発生の確認が可能となると考えられる。

#### 4-1 入力電力に対する接着面の振動変位 $A$ の測定

ガラスが1枚のときの振動変位  $A$  を測定し、接着界面の振動変位と発生する高調波量の検討を行う。実験システムは3-3と同様のシステムを用い、測定点はFig.4において  $A_{dif}$  の値が最大であった  $x=2000 \mu\text{m}$  の点とした。入力電力を  $0.1 \text{ W}$  から  $1 \text{ W}$  まで  $0.1 \text{ W}$  ずつ変化させ測定を行い、その他の実験条件は3-3と同一とした。

入力電力に対するガラス端面の振動変位をFig.5に示す。この結果から振動変位は入力電力が  $0.5 \text{ W}$  付近から飽和していることが確認できる。つまり接着面の振動変位の最大値は約  $20 \text{ nm}$  であるといえる。

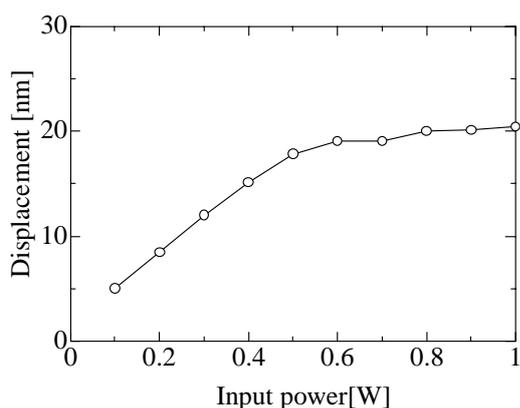


Fig.5 振動変位—入力電力特性(ガラス間の接着層なし,  $x=2000 \mu\text{m}$  を測定)

#### 4-2 入力電力に対する $A_{dif}$ の測定

次に同様の測定システムを用いてガラスが

2枚の場合の入力電力に対する  $A_{dif}$  の測定を行う。測定は振動子中心点( $x=0$ )と  $x=2000 \mu\text{m}$  の点において行った。

振動子中心点( $x=0$ )における測定結果をFig.6に,  $x=2000 \mu\text{m}$ における測定結果をFig.7に示す。その結果  $x=2000 \mu\text{m}$ における測定結果では入力電力  $0.2 \text{ W}$  付近を境に  $A_{dif}$  が向上している。これは、隙間の幅よりも接着面の振動変位が大きくなる点であると考えられ、接触型非線形超音波発生の閾値であると考えられる。これと比較して,  $x=0$ における結果では閾値のような特性は確認できない。

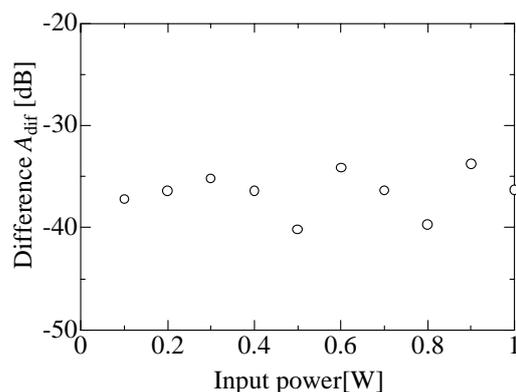


Fig.6 2次高調波振幅差の入力電力特性( $x=0$ )

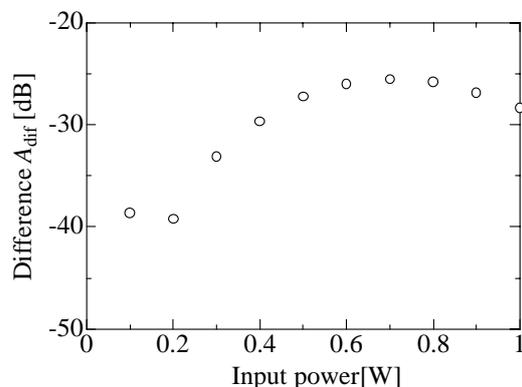


Fig.7 2次高調波振幅差の入力電力特性 ( $x=2000$ )

### 4-3 $A_{dif}$ -振動変位特性の算出

以上の結果から、Fig.7の横軸の入力電力をFig.5の入力電力 - 振動変位特性を用いて振動変位に描きなおしたグラフをFig.8に示す。この結果より  $x=2000\mu\text{m}$  の点において接着層に加わる振動変位が約 8 nm を越えた辺りから  $A_{dif}$  の値が向上していくことが分かる。このことから接着層内部に微小な隙間が生じていること、またその隙間よりも大きい振動変位が接触界面に加わった場合に接触型非線形超音波が発生していることが示された。

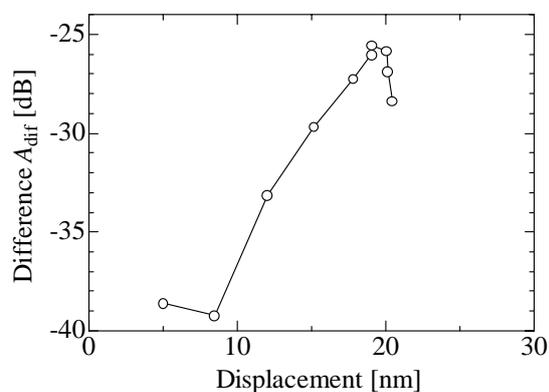


Fig.8  $A_{dif}$  - 振動変位特性

## 5.おわりに

本研究では2枚のガラス板を用い接着層内部での接合状態と発生する高調波量についての検討を行った。その結果接着層内に不完全接合による空隙が生じている場合、その点から接触型非線形超音波に起因した2次高調波が発生し、基本波に対する2次高調波振幅  $A_{dif}$  が向上することを確認した。

今後の課題としては異なる結合材を用いた場合についての検討、接合界面の傾斜、表面粗さなどの影響の検討などが挙げられる。

## 《参考文献》

- 1) Kazusi YAMANAKA, Tsuyoshi MIHARA, Toshihiro TSUJI: “Evaluation of Closed Cracks by Model Analysis of Subharmonic Ultrasound” Japanese Journal of Applied Physics, Vol43, No.5B, pp3082~3087 (2004)
- 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”
- 3) 川嶋紘一郎: “接触型非線形超音波を用いた工業材料の非破壊評価・検査”, 非破壊検査第56巻6号, pp274~279 (2007)
- 4) 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, pp12~18(2007)
- 5) 山田龍三, 堀尾浩次 “非線形超音波法を利用した $\gamma$ TiAl合金/鋼拡散接合部の品質保証” 電気製鋼, 第77巻3号 pp207~214 (2006)