

固体中の亀裂で発生する 非線形振動成分の測定

Measurement of nonlinear vibration components generated from crack in solid

○原田 貴之*, 福田 誠*, 今野 和彦*
○Takayuki Harada*, 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：固体(Solid), 亀裂(Crack),
非線形振動(Nonlinear Vibration), 高調波(Harmonic),
接触型非線形超音波(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
今野 和彦, Tel : (018)889-2490, Fax : (018)837-0406, E-mail : imano@ipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

工業製品や構造物などの固体中に生じる疲労亀裂や応力腐食割れのような、開口幅がnmオーダーのほとんど閉じた亀裂は 閉口亀裂と呼ばれている。閉口亀裂は、視覚的に確認することが困難であるとされるほか、剥離などにより材料内部に生じる可能性もあることから、発見が遅れて重大な欠陥・構造物の破壊につながる危険性を持つため、早期の発見が望まれている¹⁾。

この閉口亀裂を検出する方法として、接触型非線形超音波(CAN: Contact Acoustic Non-linearity)²⁻⁵⁾を利用する手法がある。CANとは、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ことで、亀裂同士が衝突し合うことで非線形振動が発生し、入射した周波数の非線形成分

である高調波が発生する現象である。CANによって発生する高調波を、亀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とされている。非線形超音波を用いた計測は線形超音波を用いた計測に比べ、閉口亀裂に対して感度が高く有用であるとされている。しかし、強い力で閉じた亀裂においては、超音波が亀裂に達してもそのまま透過してしまい、亀裂で非線形振動が起らず高調波が発生しないことから閉口亀裂の検出を行うことができない場合がある²⁾。さらに、亀裂面の衝突により非線形超音波が発生することが分かっているが、実際の亀裂の振動メカニズムは明らかとなっていない¹⁾。また、大振幅超音波を用いると超音波探傷に用いる探触子内部において、探触子と固体材料間の接合層でCANが生じてし

まい、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、誤った情報を得てしまうことがある³⁻⁵⁾。

以上の理由により、非線形超音波に関してはその発生メカニズムについて未解明の部分が多くあることと、測定時に接合層の問題があることから、閉口亀裂の検出に対してCANの実用化までには進んでいない。

本研究では、亀裂を作成したガラスを用いた振動変位の測定により、亀裂で発生する非線形振動成分の測定を行う。

2. 非線形振動成分の発生原理²⁾

ひずみの2次関数で表される応力項が負の値をとるとき、線形部分と重ね合わせた応力ひずみ関係は非線形となり、引張側に比べて圧縮側の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)よりヤング率の平方根に比例するため、引張相より圧縮相の波が速く伝搬する。これにより入射した有限振幅超音波にひずみが発生し、高調波成分を伴う。

Fig.1に、亀裂面に超音波を送波したときのモデルを示す。入射波振幅 A 以下の亀裂開口幅(δ_1, δ_2)の閉口亀裂を内部に含む弾性体に有限振幅超音波を入射したとき、入射振幅 A の超音波を開口幅($\delta_2 < A$)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($\delta_1 \ll A$)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。そのため透過波は半波整流されたような波形となり、元の波形に対してひずみが生じた状態になり高調波が発生する。

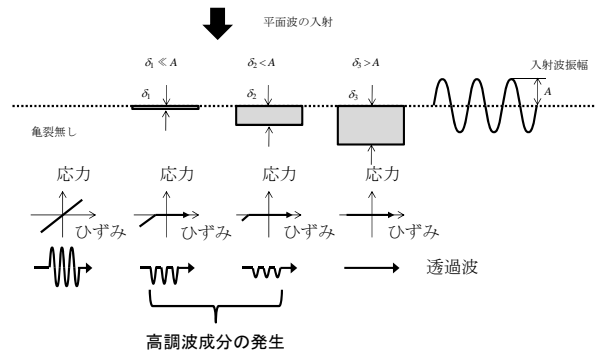


Fig.1 亀裂での応力-ひずみ特性

3. 測定システム

亀裂の無い試料と亀裂のある試料を用いて測定を行う。試料には亀裂の状態を確認することができるソーダガラスを用いる。

測定システムを Fig.2 に示す。亀裂面での振動変位が亀裂幅以上になるときに亀裂同士が衝突し合うことで非線形振動が発生する。よって、透過してきた超音波は亀裂で発生した非線形振動成分を含んでいる。しかし、トランスデューサ等を用いるとガラスとの接触面積が大きいため亀裂のどの場所を透過してきたか判別が難しい。さらにガラスと接触をすることで、接合境界面で非線形振動が発生する可能性がある。そこで超音波の検出にはレーザドップラ振動計(グラフテック AT3600/3700)を用いて、透過してきた超音波によるガラス端面の振動変位を非接触で測定する。

測定システムについて。圧電振動子はサリチル酸フェニルを用いてソーダガラスに貼り付ける。ソーダガラスの受波側には鏡面シールを貼り付けて、レーザドップラ振動計を用いて振動変位が測定できるようにする。発振器(HEWLETT-PACKARD HP33120A)より、バーストサイン波 10 波を発生し、高周波増幅器(THAMWAY T145-4715B)と整合回路(THAMWAY T020-4734A)を介して圧電振動子を駆動する。圧電振動子より送波された超

音波は、ガラスを伝搬し圧電振動子とは反対側のガラス表面に張り付けた鏡面シールに伝わる。鏡面シール表面の振動変位を、レーザドップラ振動計を用いて測定する。このとき測定点が圧電振動子の中央になるようにソーダガラスに貼りつける。測定した振動変位は反射波の混在を防ぐためベクトルシグナルアナライザ(Agilent Technologies 89441A)でゲートをかけて取り込み、検出した波形の周波数スペクトルを観測する。

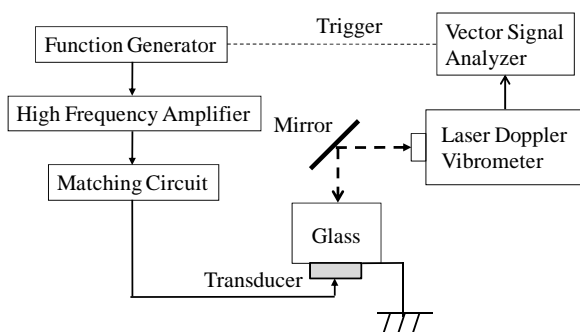


Fig.2 測定システム

4. 振動変位の測定

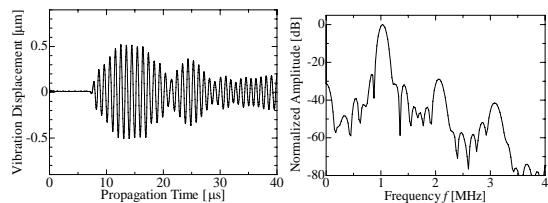
4-1. 各ガラスの振動変位測定

Fig.2 の測定システムを用いて、振動変位と周波数スペクトルの測定を行う。測定に用いるガラスは、亀裂を入れていないガラスと亀裂を入れたガラスの2種類を用意した。亀裂を入れていないガラスで測定した振動変位波形と周波数スペクトルの例を Fig.3 に示す。

また、亀裂を入れたガラスの測定は Fig.4 示すように、ガラスを側面から見て亀裂の先端部と亀裂の中央、亀裂の先の3か所で測定を行った。この亀裂先端部は Fig.4 の亀裂の太い部分から進行してできた亀裂である。

印加電圧を $10 \sim 130 \text{ V}_{pp}$ の間で変化させたときの各ガラスでの印加電圧-振動変位と印加電圧-2次高調波成分特性を Fig.5 に示す。2次高調波成分の値は、それぞれの電圧での基本波に対する2次高調波成分で正規化した

値である。Fig.5 より、亀裂無し(Fig.5 (a))で出ている2次高調波成分は圧電振動子とガラスの接着面で起きた非線形振動によるものであると考えられる。また Fig.5 (a)と亀裂先端(Fig.5 (b))において同じ印加電圧時に振動変位と2次高調波成分が近い値を示していることから、亀裂先端部においては超音波が亀裂面で非線形振動を起こさずにそのまま透過しているのではないかと考えられる。亀裂中央(Fig.5 (c))より、Fig.5 (a)と Fig.5 (b)に比べて振動変位が小さいことから、亀裂先端に比べて亀裂幅が開いていることが確認できる。また亀裂の先(Fig.5 (d))の結果を亀裂無し(Fig.5 (a))と合わせた図を Fig.6 に示す。亀裂無しに比べて振動変位が減少し2次高調波成分が大きいことから、亀裂の先には目に見えない閉口亀裂が存在し非線形振動が発生している可能性がある。



(a) 振動変位波形 (b) 周波数スペクトル
Fig.3 振動変位波形と周波数スペクトルの例

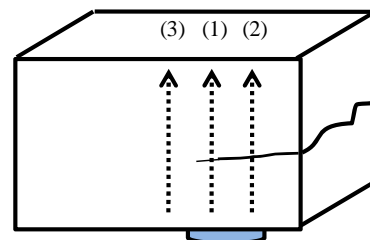
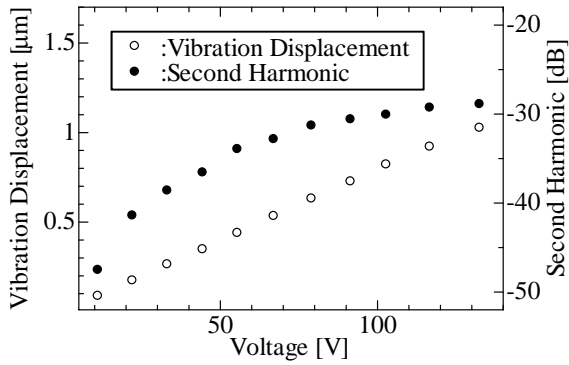
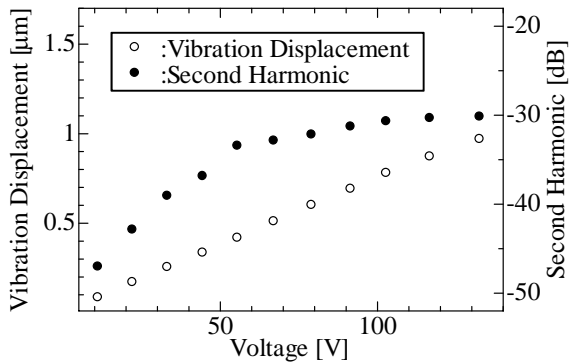


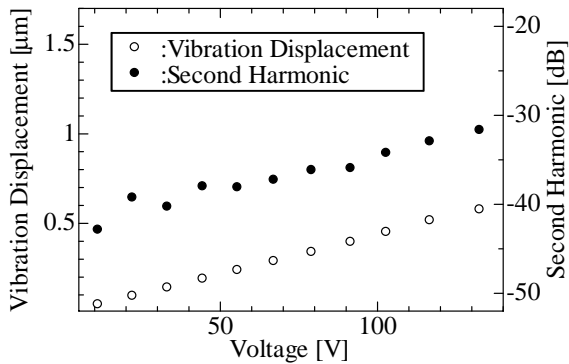
Fig.4 亀裂を入れたガラスの測定位置



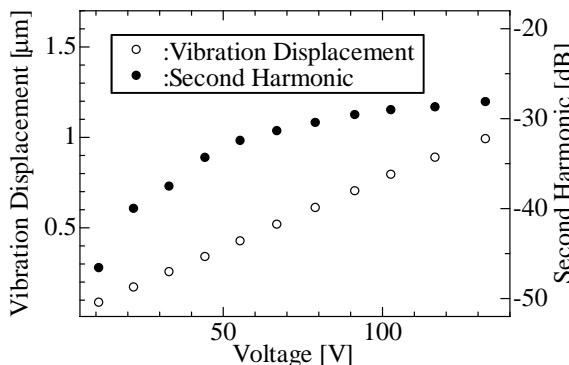
(a) 亀裂無し



(b) 亀裂先端



(c) 亀裂中央



(d) 亀裂の先

Fig.5 印加電圧－振動変位特性

・印加電圧－2次高調波成分特性

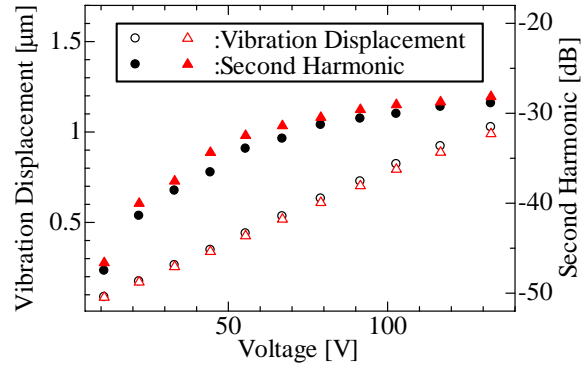


Fig.6 亀裂無し(Fig.5 (a))と亀裂の先(Fig.5 (d))の比較 (●：亀裂無し，▲：亀裂の先)

4.2. 亀裂に荷重を加えた時の測定

亀裂幅の変化による振動変位の測定を行うために、Fig.7に示すように亀裂をワッシャで挟んでネジの締め付けにより亀裂に荷重を加えて行う。ネジの軸力を測定するロードセル(昭和測器 M781603)を用いて軸力を変化させながら測定を行う。軸力が均一に測定できるように、亀裂を入れたガラスの反対側に同じ高さのガラスを用意して、かませとして一緒にワッシャで挟み、ネジによる荷重がガラスに均一に加わるようにする。

圧電振動子への印加電圧を $130 V_{p-p}$ としたときの、亀裂に荷重を加えた時の荷重－振動変位特性と荷重－2次高調波成分特性をFig.8に示す。Fig.8より、亀裂先端の(a)から、荷重を変化させても振動変位と2次高調波成分が変化していないことが確認できる。よって、3-1での結果と合わせるとこの亀裂先端の部分は閉口亀裂に近い状態であると考えられる。また亀裂中央の(b)より、荷重増加にともなって振動変位は増加する結果となった。ここで、荷重 3.0 kNでは振動変位の値が亀裂無しと亀裂先端の結果と近い値になったことから、徐々に亀裂幅は狭まっていき、亀裂中央が閉口亀裂に近い状態にあったのではないかと考えられる。また、2次高調波成分は荷重 1.5, 2.0 kNで大きな値となる結果となった。この結果

より、非線形振動を起こすにあたって発生しやすい亀裂幅があるのではないかと考えられる。

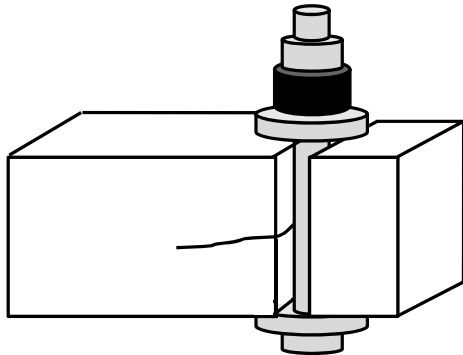
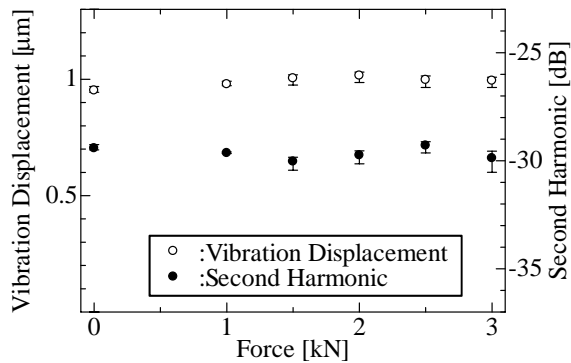
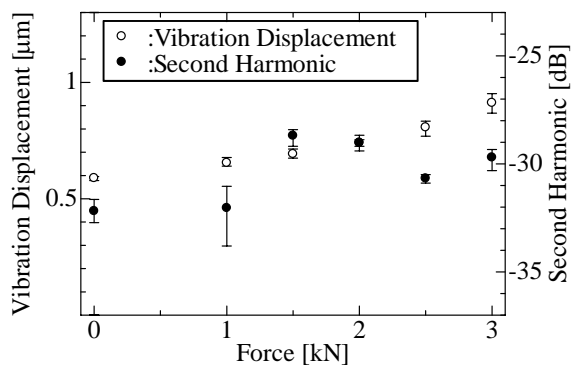


Fig.7 亀裂への荷重の加え方



(a) 亀裂先端



(b) 亀裂中央

Fig. 8 荷重－振動変位特性

・ 荷重－2次高調波成分特性

5. おわりに

本研究では、亀裂を作成したガラスを用いた振動変位の測定により、亀裂で発生する非

線形振動成分の測定を行った。その結果、亀裂の先に閉口亀裂が存在する可能性を示した。また、荷重増加による亀裂幅変化により振動変位は増加したが2次高調波成分が1.5, 2.0 kNで大きな値となったことから、非線形振動が起こりやすい亀裂幅が存在するのではないかと考えられる。

今後の課題としては、パルスインバージョン法を用いた亀裂の評価、亀裂幅と非線形振動の影響についての検討を行うことが挙げられる。

《参考文献》

- 1) 齊藤隆泰, 中畑和之, 古田雄輔, 廣瀬壮一: “時間域境界要素法を用いた非線形超音波法における高調波の励起シミュレーション”, 計算数理工学論文集, Vol.9, No.06-091211 (2009-12)
- 2) 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－密着き裂と微細損傷の高調波画像化”, 非破壊検査, Vol.56, No.6, pp.274-279 (2007)
- 3) Fukuda Makoto, Morimasa Nishihira and Kazuhiko Imano: “Real Time Detection of Second-Harmonic Components Generated from Plastic-Deformed Metal Rod Using Double-Layered Piezoelectric Transducer”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, No.7B, pp.4529-4531 (2007)
- 4) 川上淳平, 今野和彦: “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”, 計測自動制御学会, Vol.244, No.6 (2007-06)
- 5) 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, Vol.20, No.1, pp12~18(2007)