解説

非線形超音波法による非破壊検査・評価 V

複数モード非線形共鳴超音波スペクトロスコピーを用いた閉じたき裂の位置特定

東北大学大学院工学研究科　小原　良和　　米国ブリガムヤング大学　Brian ANDERSON
米国ロスアラモス国立研究所　T. J. ULRICH　Pierre-Yves LE BAS
Paul JOHNSON
仏国ソルボンヌ大学　Sylvain HAUPERT

Localization of Closed Cracks Using Multi-Mode Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy

Tohoku University　Yoshikazu OHARA
Brigham Young University　Brian ANDERSON
Los Alamos National Laboratory　T. J. ULRICH, Pierre-Yves LE BAS and Paul JOHNSON
Sorbonne University　Sylvain HAUPERT

キーワード　非線形共鳴超音波スペクトロスコピー，複数モード，閉じたき裂，位置特定

解説

1．はじめに

共鳴超音波スペクトロスコピー（Resonant Ultrasound Spectroscopy：RUS）は，形状および密度が既知の材料に対して，共鳴周波数を計測することで2次弾性定数を測定する方法である[1)−3)]。RUSはレーザドップラー干渉計による振動モード特定との組み合わせによりその信頼性向上が実現され[4)−7)]，高精度計測法の開発により圧電定数の計測も実現された[8)]。

その応用として，局所的な線形欠陥の発生による共鳴周波数シフトを利用した非破壊検査法も提案された[3)]。しかし，閉じたき裂などの初期欠陥が共鳴スペクトルに与える影響は周波数分解能以下であることが多い。

一方，非線形弾性特性や非線形（閉じた）欠陥の測定法として，入射波振幅に依存した共鳴周波数シフトを利用した非線形超音波共鳴スペクトロスコピー（Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy：NRUS）の研究も始まった。これは，主に，共鳴スペクトルの入射波振幅依存性を計測する手法である。NRUSによる3次弾性定数測定はその数学的難解さから理論研究[9),10)]の開始段階にあるが，グローバルな非線形性を計測する実験的研究は，岩石[11)−13)]・コンクリート[14)−17)]・セメント[18)]・金属[19),20)]・複合材料[21)]などを対象として非破壊検査的な側面だけではなく，地震を含む地球物理学の発展のため，多数行われてきた。これらは，主に単一の振動モードに対して行われる計測であることから，単一モード非線形超音波共鳴スペクトロスコピー（Single-mode NRUS）とも呼ばれる[13)]。

さらに，この発展として，局所的な非線形欠陥の位置特定法である，複数の振動モードを用いたNRUS（Multi-mode NRUS）が提案された[22)]。そして，一次元の時間領域有限差分（Finite-Difference Time-Domain：FDTD）シミュレーションにより，複数の共鳴モードに対する非線形応答を調べることで，欠陥位置の特定が可能であることが実証された。また，実験では，適切な振動モードを選択することで，高感度にボルトの締め付け具合をモニタリングすることができることが実証された[23)]。しかし，閉じたき裂での実証試験やその位置特定に関する実験的検証はなされていなかった。

そこで本研究では，シンプルな形状の閉じたき裂試験体にMulti-mode NRUSを適用し，共鳴周波数シフトの振動モード依存性を調べることで，その実験的検証を行った結果について解説する。さらに，大振幅超音波入射に伴う分調波の発生挙動の観察などについても報告する。

2．Multi-mode NRUS

NRUSは入射波振幅に依存した共鳴周波数のシフト量等を計測することで，対象の非線形性を計測する手法である。例えば，低ひずみε_Lで周波数掃引し，その応答から共鳴周波数f_0が計測されたとする。このとき，ε_Lが十分小さい場合，f_0は線形の共鳴周波数に相当する。一方，高ひずみε_Hで同様の計測行うと，線形の試験体では共鳴周波数はf_0のままだが，非線形性を有する試験体では，その非線形弾性特性により共鳴周波数がfにシフトする。このシフト量を$\Delta f = f_0 - f$，ひずみ差を$\Delta\varepsilon = \varepsilon_H - \varepsilon_L$とおくと，非線形性の指標として，下記の式の$\alpha$が表される。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \alpha \Delta\varepsilon \qquad \cdots\cdots (1)$$

上式より，$\Delta\varepsilon$に対してΔfが大きいほど，αが大きいこととなり，非線形性の強い媒質ということになる。このようなNRUSは，均一な非線形弾性特性を持つ材料に多く適用されてきたことから，単一モードに着目した計測（Single-mode NRUS）が多かった。

一方，非線形欠陥（閉じたき裂等）が局在化する場合，振動モードに依存して共鳴周波数のシフト量は異なる。例えば，振動モードの節に非線形欠陥がある場合，入射波振幅に依存した共鳴周波数シフトは起こらない（**図1**左）。一方，振動モードの腹に非線形欠陥がある場合，入射波振幅増大に伴い，き裂面の非線形振動に起因して共鳴周波数シフトが起こる（図1右）。

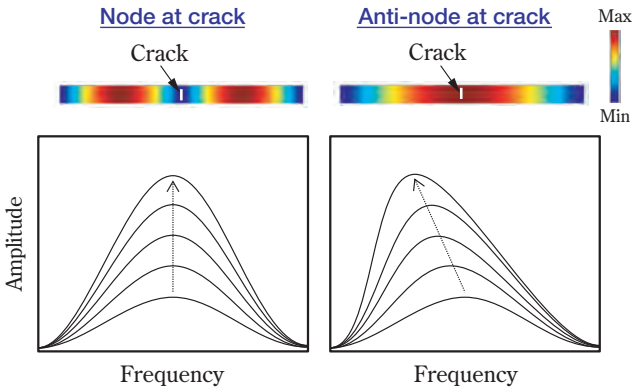

図 1　Multi-mode NRUS の概念図

それゆえ，Multi-mode NRUS では，共鳴周波数シフトの振動モード依存性を調べることで，局所的な非線形欠陥の検出だけではなく，位置特定も可能となる。

3．実験条件

Multi-mode NRUS の基本原理実証のため，疲労き裂の先端から応力腐食割れを進展させた試験体を用いた[24]。ここでは，鋭敏化（600℃，4 時間）したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 に，3 点曲げ疲労試験（疲労条件：最大応力拡大係数 K_{max} ＝ 28MPa$\sqrt{m}$，最小応力拡大係数 K_{min} ＝ 0.6MPa$\sqrt{m}$）で約 10mm の深さの疲労き裂を導入した。次に，90℃，30%$MgCl_2$ 水溶液の腐食環境に試験片を浸漬し，公称曲げ応力 124MPa を 650h 作用させることで，疲労き裂先端から SCC を進展させた。最後に，試験片を 25mm × 25mm × 2mm のサイズにスライスした。本試験片は，閉じたき裂の映像法 SPACE（Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation）[25)－27)] の閉じたき裂深さの計測精度実証[24] のために作製したが，本研究では Multi-mode NRUS の測定に用いた。

測定配置を**図 2** に示す。NRUS の計測ソフトウェアには，米国ロスアラモス国立研究所 Geophysics Group により開発された RITA（Resonance Inspection Techniques and Analyses）[17] を用いた。図 2 (b) に示すように，PZT 探触子（ϕ10mm）を試験片側面に接着し，励起電圧を 10V ～ 200V（10V 刻み）で変化させて，試験片を励振した。受信には，走査型レーザ振動計（Polytec PSV-400）を用い，振動モード解析等には付属ソフトウェアを用いた。受信点には，試験片上の 9 × 9 の 81 点を選択した。共鳴スペクトルの計測では，測定点ごとに差が出るため，全ての測定点（計 81 点）のスペクトルの総和を用いた。また，受信レーザの試験片からの反射光強度を増大させ，高い SN（Signal-to-Noise）比を保持するため，試験片表面には，3M 社製再帰性反射テープを貼付した。

4．実験結果

閉じたき裂試験体の共鳴スペクトルを**図 3** (a) に示す。ここで，緑と赤は各々振動変位の大きい腹，黒は振動変位の小さい節を表す。複数の共鳴ピークが観察されたが，振動モードの解析により，f ＝ 4.28kHz（図 3 (b)）では，き裂が振動モードの節の部分にあることが分かった。一方，f ＝ 12.33kHz の振動モード（図 3 (c)）では，き裂が腹の部分に相当することが分かった。

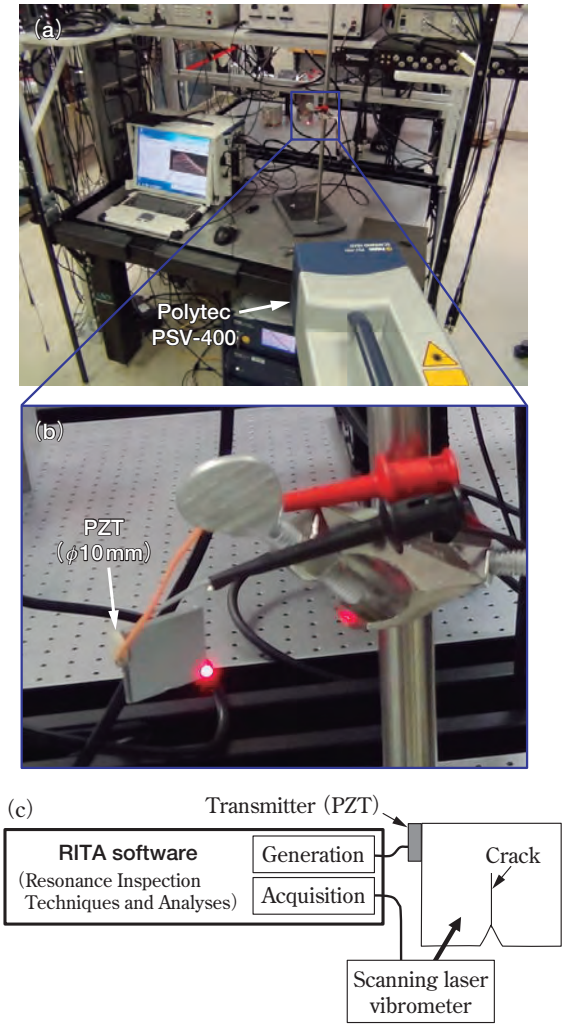

図 2　測定条件
(a) 測定装置概観，(b) 試験片と探触子 ((a) の拡大写真)，(c) 測定系概念図

そこで，各共鳴周波数の励起電圧依存性を調べた。その結果，f ＝ 4.28kHz 近傍（**図 4** (a)）では共鳴周波数のシフトは観察されなかった。これは，き裂が振動モードの節に位置しており，き裂の開閉振動が起こらなかったためと考えられる。一方，f ＝ 12.33kHz 近傍（図 4 (b)）では明瞭な共鳴周波数シフトが観察された。これは，き裂が振動モードの腹に位置していたためと考えられる。さらに，励起電圧に対して，定量的に共鳴周波数シフト量を調べた（**図 5**）。その結果，f ＝ 4.28kHz 近傍の場合，低励起電圧では SN 比が低いため，ばらつきが観察されたが，高励起電圧でも共鳴周波数シフトは観察されなかった。一方，f ＝ 12.33kHz 近傍では，明瞭な共鳴周波数シフトが観察された。以上より，振動モードが既知の材料に対して，振動モードごとの共鳴周波数シフトを調べることで，き裂の位置特定ができるという Multi-mode NRUS の基本原理が実験的に実証された。

5．考察

5.1　入射条件による非線形成分の発生の差異

本解説では，Multi-mode NRUS の原理の実験的検証を目的として，振動モードごとの共鳴周波数シフトの励起電圧依存性に着目してきた。一方，非線形性の他の指標として，単一

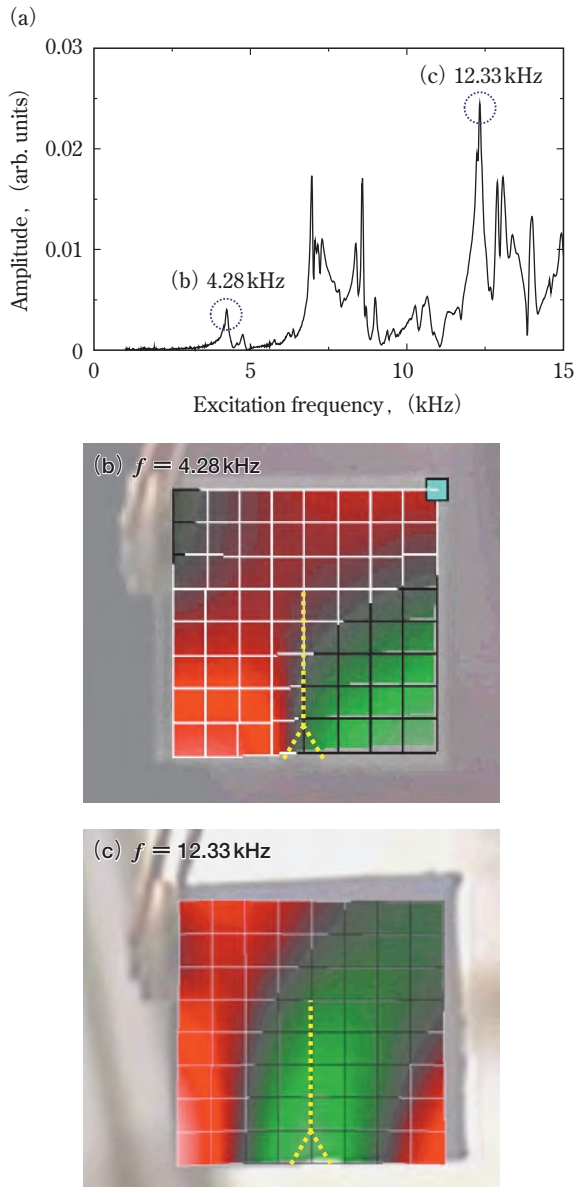

図 3　共鳴スペクトルと振動モード

(a) 共鳴スペクトル，(b) f = 4.28 kHz の振動モード，(c) f = 12.33 kHz の振動モード

周波数励振に対して発生する非線形成分もその候補になりうる。これらは共に閉じたき裂の開閉振動に起因するため，振動モードによる非線形性成分の発生量の差は，共鳴周波数シフトで観察された結果と相関がある可能性がある。その場合，励振周波数を掃引せずとも Multi-mode NRUS を実現できる可能性が出てくる。そこで，先に調べた 2 つの振動モードで単一周波数励振を行い，その受信波形の振幅スペクトルを調べた。

き裂が振動モードの節に相当する f = 4.28 kHz の励振条件では，**図 6** (a) の振幅スペクトルに示すように，複数の高調波のみ観察された。一方，き裂が振動モードの腹に相当する f = 12.33 kHz の励振条件では，図 6 (b) の振幅スペクトルに示されるように，高調波に加えて，$f/4$ の分調波成分の発生が観察された。さらに,その分調波と基本波の非線形ミキシング(和や差の周波数）成分だけではなく，高調波と分調波の非線形ミキシング成分など,強い非線形応答が観察された。以上より，単一周波数励振の場合も，振動モードに依存して，非線形成

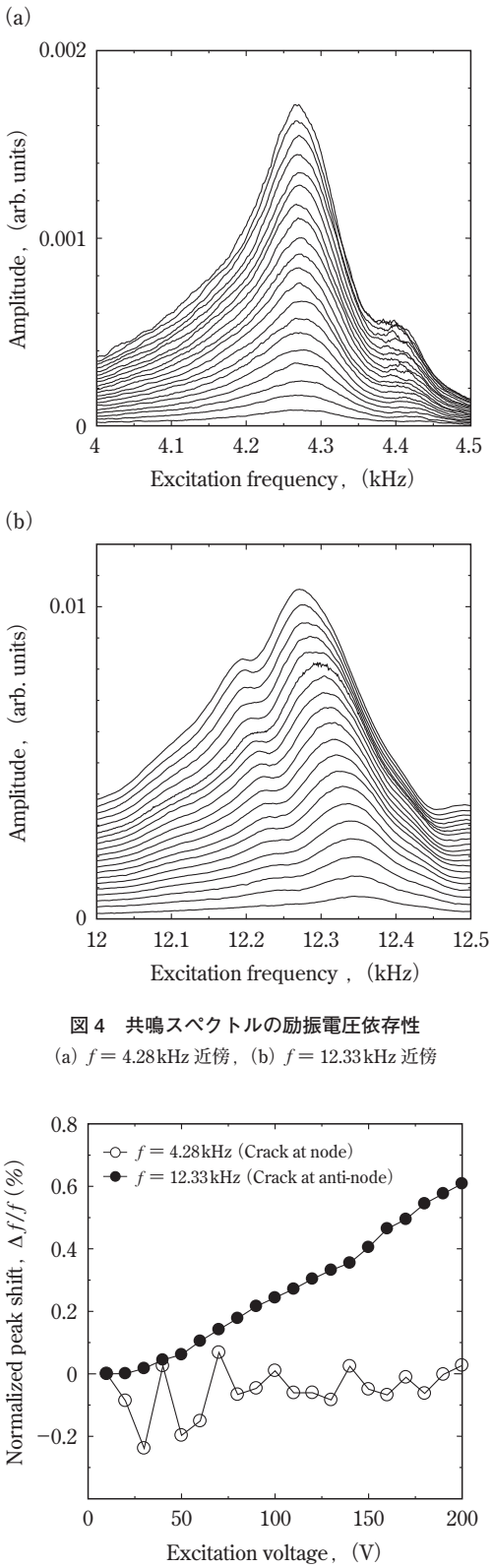

図 4　共鳴スペクトルの励振電圧依存性

(a) f = 4.28 kHz 近傍，(b) f = 12.33 kHz 近傍

図 5　正規化された共鳴周波数シフトの励起電圧依存性

分の発生に大きな差が生じ，その傾向は共鳴周波数シフトと一致することが分かった。特に，分調波の発生はき裂のみで起こることから，閉じたき裂の位置特定には有効であると期待される。

5.2　大振幅励振条件での分調波のしきい値挙動の観察

5.1 で単一周波数励振により，$f/4$ の分調波の発生が観察されたが，他の分調波（$f/2$, $f/3$ など）は観察されなかった。これは，入射波振幅がそれらの発生には十分ではなかった可

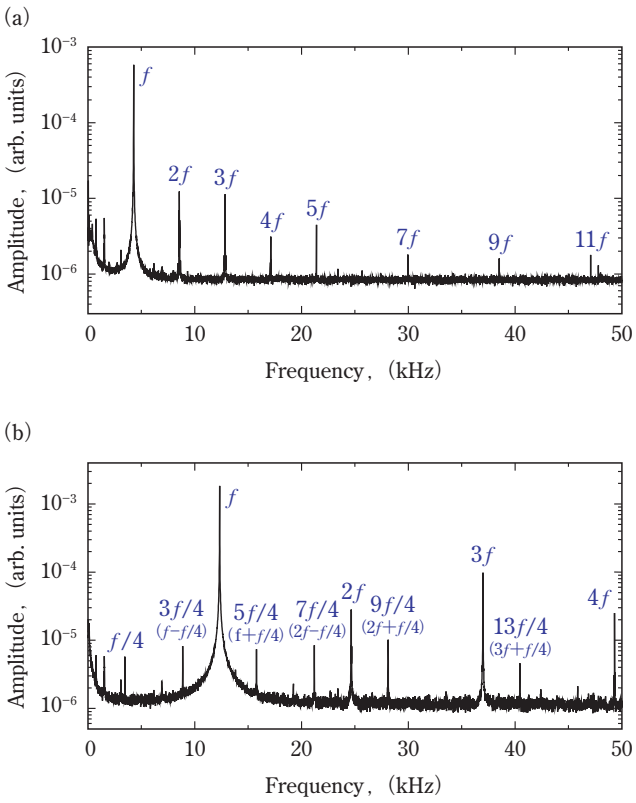

図 6　単一周波数励振に対する振幅スペクトル
(a) $f = 4.28\,\mathrm{kHz}$, (b) $f = 12.33\,\mathrm{kHz}$

能性が考えられる。そこで，より大振幅超音波を入射できる条件を選択し，分調波の発生挙動について調べた。

図 3 (a) より広い周波数帯域で計測した共鳴スペクトルを**図 7** に示す。これにより，50 kHz で最大のピークが観察され，大振幅励振に適していることが分かった。そこで，入射周波数を 50 kHz に固定し，入力電圧を 50 V から 200 V まで 50 V 刻みで増加させた。計測された振幅スペクトルを**図 8** に示す。励起電圧 50 V では高調波のみ発生し，分調波の発生は観察されなかった。一方，励起電圧を 100 V に増大すると，2 つの分調波（$f/3$, $f/4$）の発生が観察された。さらに励起電圧 150 V では，複数の分調波が観察され，$f/2$ の成分もわずかに観察された。励起電圧を 200 V まで増大すると，さらに多くの分調波成分が観察され，$f/2$ の成分も急激に増大した。

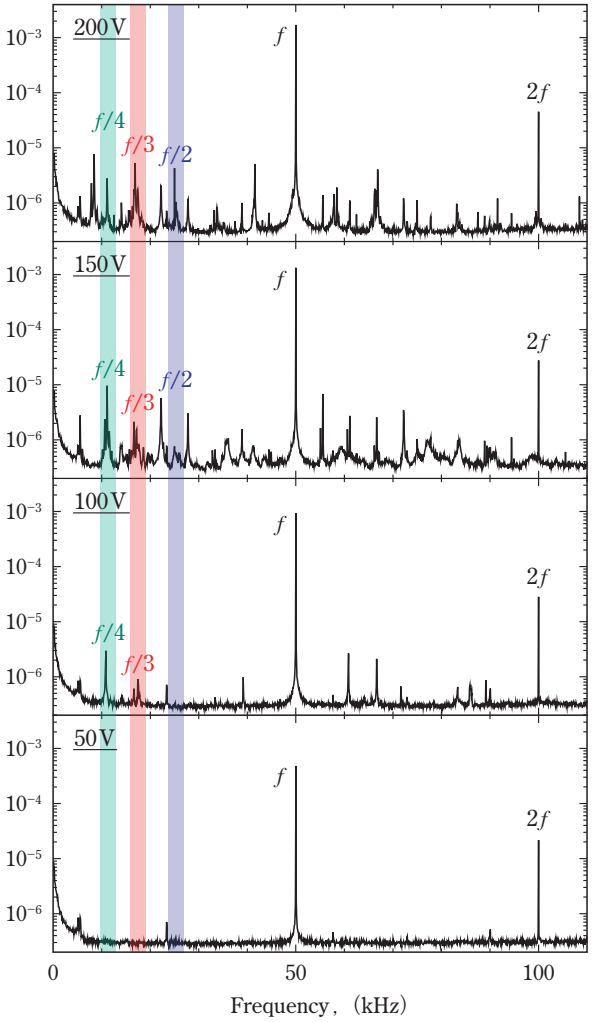

図 8　単一周波数励振（$f = 50\,\mathrm{kHz}$）における振幅スペクトルの励起電圧依存性

ここで，複数の分調波のなかでも $f/2$, $f/3$, $f/4$ に着目し，その励起電圧依存性を調べた（**図 9**）。その結果，明瞭なしきい値現象が観察された。特に注目すべきは，分調波でもその周波数に依存して，しきい値が異なった。例えば，$f/4$ はしきい値は低く，次に $f/3$，そして $f/2$ は最もしきい値が高かった。また，しきい値が最も低かった $f/4$ は励起電圧 150 V で最大値を取り，200 V で応答は大きく低下した。一方，200 V 励振で

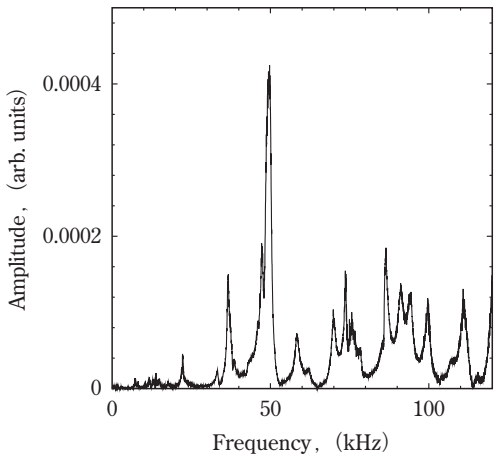

図 7　広周波数帯域の共鳴スペクトル

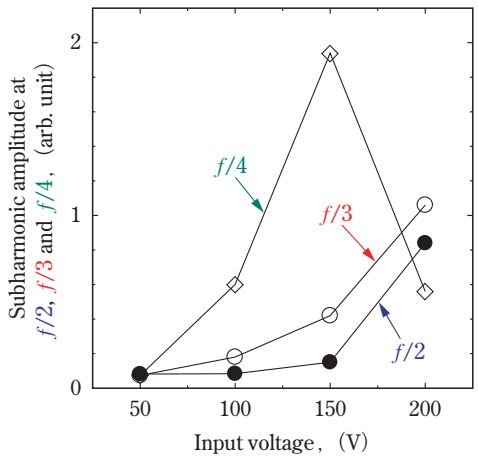

図 9　分調波の励起電圧依存性

$f/2$ と $f/3$ が最大値を取ったことから，$f/4$ のエネルギーがそれらの分調波に分配されたようにも見える。

さらに，$f/2$ の周波数成分のみをフィルタで抽出し，各励起電圧に対する振動モードを同じスケールで表示した（**図 10**）。この振動モードからも明瞭なしきい値現象が観察された。

以上のように，分調波の発生は複雑である。本解説では，主に $f/2$，$f/3$，$f/4$ に着目したが，それ以外にも分調波を含む複数の非線形成分が観察された。これらは，しきい値や発生量も異なることから，個別の利用には慎重を期す必要があるが，例えば，分調波成分の総和を取れば，き裂の計測に利用できる可能性もある。一方，本研究で選択した 50kHz は複雑な振動モードを有するため，Multi-mode NRUS のパラメータとしては適していない。この実現には，振動モードがシンプルな低次のモードで，より大振幅な励振を行う必要があり，より高い圧電特性を持つ振動子の利用や大電圧印加などの工夫が必要である。

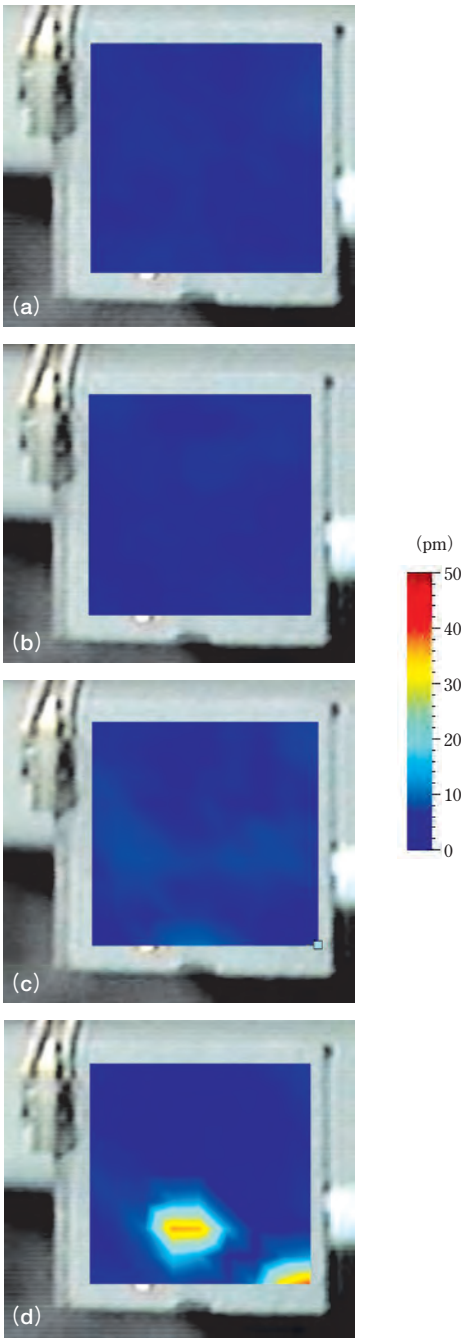

図 10 分調波（$f/2$）の振動モードの励起電圧依存性
（a）励起電圧 50V，（b）100V，（c）150V，（d）200V

5.3 Scaling Subtraction Method（SSM）の適用性検討

非線形成分の新たな計測法として，近年，Scaling Subtraction Method（SSM）[28] が注目を集めている。これは，非線形成分の発生が，全て基本波のエネルギーから分配されることによることを利用した手法である。例えば，線形系であれば，入射波振幅を a 倍すると，応答も a 倍になる。一方，閉じたき裂などの非線形性を有する系では，入射波振幅を a 倍すると，非線形現象により，基本波成分の一部が非線形成分（高調波，分調波など）へと分配される。それゆえ，基本波のエネルギーに着目すると，小振幅の基本波の応答を a 倍したものより，a 倍の入射波振幅の基本波の応答の方が小さくなる。その差分を計測することで，非線形性を計測する。このように SSM は，非線形成分を直接観察する必要が無いことから，高調波などの高周波成分の計測が困難な，高減衰材料（コンクリートなど）の対象を中心に，盛んに研究されている[29)－37)]。

そこで，本研究でもその適用性を検討するため，50kHz 励振に対する基本波振幅の応答の入力電圧依存性を調べた（**図 11**）。その結果，入力電圧 150V を超えると，線形からのずれが明瞭になり，200V でその差は大きくなった。これは，図 7 の非線形成分の発生量増大の傾向とも良く一致する。以上より，SSM が非線形性の指標として利用できる可能性があることが分かった。

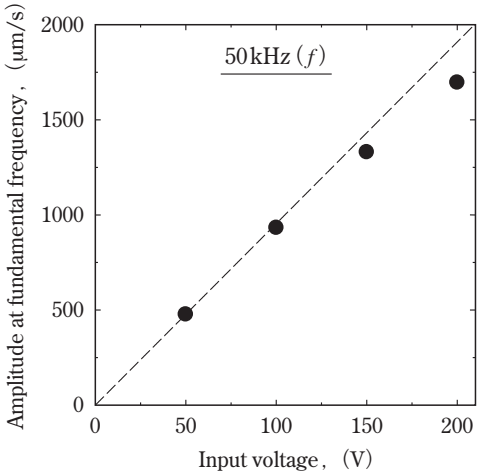

図 11 基本波（f）振幅の励起電圧依存性

6. おわりに

複数の振動モードを用いることにより局所的な欠陥の位置特定を行う複数モード非線形共鳴超音波スペクトロスコピー（multi-mode NRUS）を閉じたき裂試験体に適用した。その結果，振動モードに依存した，入射波振幅増加に伴う共鳴周波数シフトの差異が明瞭に観察された。以上より，multi-mode NRUS の基本原理が実験的に実証された。

さらに，単一周波数励振により分調波のしきい値現象を含む明瞭な非線形成分の発生も詳細に観察した。閉じたき裂の深さ計測[24)－27)] などでは，高い時間分解能を得るため，短いバースト波を使うことが多いが，この場合，周波数分解能は低くなり，線形・非線形成分の適切な分離には細心の注意が

必要である。一方，本解説で示したような連続波の計測は，時間分解能が低い分，周波数分解能は極めて高く，複雑な非線形現象もより詳細に観察可能である。現在，閉じたき裂の非線形挙動には未解明の部分も多く，非線形超音波の普及の妨害となっているが，この現状を打破するためには，本解説のような基礎研究と応用研究の両面からのアプローチが求められるであろう。

謝辞

本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金（基盤 B：15H04139，若手 A：24686081，挑戦的萌芽：26630340）の補助により行われた。

参 考 文 献

1）W. Visscher, A. Migliori, T. Bell and R. Reinert：On the normal modes of free vibration of inhomogeneous and anisotropic elastic objects, Journal of the Acoustical Society of America, 90, pp.2154-2162,（1991）
2）J. Maynard：Resonant ultrasound spectroscopy, Physics Today, 49(1), pp.26-31,（1996）
3）A. Migliori and J. L. Sarrao：Resonant Ultrasuond Spectroscopy: Applications to Physics, Materials Measurements, and Non-destructive Evaluation, Wiley, New York,（1997）
4）T. J. Ulrich, K. R. McCall and R. A. Guyer：Determination of elastic moduli of rock samples using resonant ultrasound spectroscopy, Journal of the Acoustical Society of America, 111(4), pp.1667-1674,（2002）
5）H. Ogi, K. Sato. T. Asada and M. Hirao：Complete mode identification for resonance ultrasound spectroscopy, Journal of the Acoustical Society of America, 112(6), pp.2553-2557, (2002)
6）N. Nakamura, H. Ogi and M. Hirao：Resonance ultrasound spectroscopy with laser-Doppler interferometry for studying elastic properties of thin films, Ultrasonics, 42, pp.491-494,（2004）
7）N. Nakamura, H. Ogi, M. Hirao, T. Fukuhara, K. Shiroki and N. Imaizumi：Elastic constants of single-crystal rare-earth bismuth iron garnet films, Japanese Journal of Applied Physics, 47(5), pp.3851-3854,（2008）
8）H. Ogi, N. Nakamura, M. Hirao and H. Ledbetter：Determination of elastic, anelastic, and piezoelectric coefficients of piezoelectric materials from a single specimen by acoustic resonance spectroscopy, Ultrasonics, 42, pp.183-187,（2004）
9）R. Tarumi and Y. Oshita：Free-vibration acoustic resonance of a nonlinear elastic bar, Philosophical Magazine, 91(5), pp.772-786,（2011）
10）R. Tarumi, T. Matsushita and Y. Shibutani：Numerical analysis for acoustic resonance of one-dimensional nonlinear elastic bar, Japanese Journal of Applied Physics, 50, pp.07HB02-1-5,（2011）
11）V. E. Nazarov, L. A. Ostrovsky, I. Soustova and A. M. Sutin：Nonlinear acoustics of micro-inhomogeneous media, Phys. Earth Planet. Inter., 50, pp.65-73,（1988）
12）P. A. Johnson, B. Zinszner and P. N. J. Rasolofosaon：Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock, Journal of Geophysical Research, 101(B5), pp.11553-11564,（1996）
13）K. V. D. Abeele, J. Carmeliet, J. A. Ten Cate and P. A. Johnson：Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part II: single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy, Research of Nondestructive Evaluation, 12, pp.31-42,（2000）
14）K. V. D. Abeele and J. D. Visscher：Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques, Cement and Concrete Research, 30, pp.1453-1464,（2000）
15）C. Payan, V. Garnier, J. Moysan and P. A. Johnson：Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete, Journal of the Acoustical Society of America, 121(4), pp.EL125-EL130,（2007）
16）F. Bouchaala, C. Payan, V. Garnier and J. P. Balayssac：Carbonation assessment in concrete by nonlinear ultrasound, Cement and Concrete Research, 41, pp.557-559,（2011）
17）C. Payan, T. J. Ulrich, P. Y. Le Bas, T. Saleh and M. Guimaraes：Quantitative linear and nonlinear resonance inspection techniques and analysis for material characterization: Application to concrete thermal damage, Journal of the Acoustical Society of America, 136(2), pp.537-546,（2014）
18）K. V. D. Abeele, A. Sutin, J. Carmeliet and P. A. Johnson：Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS), NDT & E International, 54, pp.239-248,（2001）
19）J. Riviere, G. Renaud, S. Haupert, M. Talmant, P. Laugier and P. A. Johnson：Nonlinear acoustic resonances to probe a threaded interface, Journal of Applied Physics, 107, pp.124901-1-9,（2010）
20）大谷俊博，草瀬祐紀，石井　優：Cr-Mo-V 鋼のクリープ中の非線形音響特性の変化と微細組織の関係，材料，62(2), pp.60-67,（2013）
21）K. V. D. Abeele：Inferring the degradation of pultruded composites from dynamic nonlinear resonance measurements, Polymer Composite, 22(4), pp.555-567,（2001）
22）K. V. D. Abeele：Multi-mode nonlinear resonance ultrasound spectroscopy for defect imaging: An analytical approach for the one-dimensional case, Journal of the Acoustical Society of America, 122(1), pp.73-90,（2007）
23）J. Riviere, G. Renaud, S. Haupert, M. Talmant: Nonlinear acoustic resonances to probe a threaded interface, Journal of Applied Physics, 107, pp.124901-1-9,（2010）
24）Y. Ohara, H. Endo, T. Mihara and K. Yamanaka：Ultrasonic measurement of closed stress corrosion crack depth using subharmonic phased array, Japanese Journal of Applied Physics, 48, pp.07GD01-1-6,（2009）
25）Y. Ohara, T. Mihara, R. Sasaki, T. Ogata, S. Yamamoto, Y. Kishimoto and K. Yamanaka：Imaging of closed cracks using nonlinear response of elastic waves at subharmonic frequency, Applied Physics Letters, 90, pp.011902-1-3,（2007）
26）山中一司，小原良和，山本　摂，三原　毅：き裂の非線形超音波映像法，非破壊検査，56(6), pp.280-285,（2007）
27）小原良和，堀之内聡，新宅洋平，柴崎　亮，山口雄一，田上　稔，山中一司：単一アレイのサブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE の開発とステンレス鋼溶接部の閉じた応力腐食割れの高選択性映像化，非破壊検査，60(11), pp.658-664,（2011）
28）M. Scalerandi, A. S. Gliozzi, C. L. E. Bruno, D. Masera and P. Bocca：A scaling method to enhance detection of a nonlinear elastic response, Applied Physics Letters, 92, pp.101912-1-3,（2008）
29）C. L. E. Bruno, A. S. Gliozzi, M. Scalerandi and P. Antonaci：Analysis of elastic nonlinearity using the scaling subtraction method, Physical Review B, 79, pp.064108-1-13,（2009）
30）P. Antonaci, C. L. E. Bruno, A. S. Gliozzi and M. Scalerandi：Evolution of damage-induced nonlinearity in proximity of discontinuities in concrete, International Journal of Solids and Structures, 47, pp.1603-1610,（2010）

31）P. Antonaci, C. L. E. Bruno, A. S. Gliozzi and M. Scalerandi：Monitoring evolution of compressive damage in concrete with linear and nonlinear ultrasonic methods, Cement and Concrete Research, 40, pp.1106-1113,（2010）
32）E. N. Janssen, K. V. D. Abeele: Dual energy time reversed elastic wave propagation and nonlinear signal processing for localization and depth-profiling of near-surface defects: A simulation study, Ultrasonics, 51, pp.1036-1043,（2011）
33）S. Delrue and K. V. D. Abeele：Three-dimensional finite element simulation of closed delaminations in composite materials, Ultrasonics, 52, pp.315-324,（2012）
34）M. Scalerandi, M. Griffa, P. Antonaci, M. Wyrzykowski and P. Lura：Nonlinear elastic response of thermally damaged consolidated granular media, Journal of Applied Physics, 113, pp.154902-1-9,（2013）
35）P. Antonaci, C. L. E. Bruno, M. Scalerandi and F. Tondolo：Effects of corrosion on linear and nonlinear elastic properties of reinforced concrete, Cement and Concrete Research, 51, pp.96-103,（2013）
36）P. Antonaci, A. Formia, A. S. Gliozzi, M. Scalerandi and J. M. Tulliani：Diagnostic application of nonlinear ultrasonics to characterize degradation by expansive salts in mansory systems, NDT & E International, 55, pp.57-63,（2013）
37）M. Scalerandi, S. Idjimarene, M. Bentahar and E. E. Guerjouma：Evidence of microstructure evolution in solid elastic media based on a power law analysis, Commun Nonlinear Sci Number Simulat, 22, pp.334-347,（2015）

小原　良和　東北大学大学院工学研究科材料システム工学専攻（980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02）　助教，博士（工学）
2007 年 3 月に東北大学大学院工学研究科材料システム工学専攻博士課程を修了し，博士研究員を経て，2008 年 5 月より現職。15 年来，閉じたき裂評価のための非線形超音波の研究に従事。2013 年より米国ロスアラモス国立研究所と共同研究を開始。
http://www.material.tohoku.ac.jp/~hyoka/

Brian Anderson
Department of Physics and Astronomy, Brigham Young University
N283, Eyring Science Center
Assistant Professor, Ph.D.
He received a Ph.D. degree from The Pennsylvania State University, State College, PA, USA, in 2006. Since then he was a postdoc at Los Alamos National Laboratory (LANL), a visiting professor at Brigham Young University (BYU), and a research scientist at LANL before being appointed as an assistant professor at BYU. His research interests center are in nondestructive evaluation and audio acoustics.
http://www.physics.byu.edu/faculty/anderson/

T. J. Ulrich
Los Alamos National Laboratory
MS D446, PO box 1663, Los Alamos NM87545, USA
Research Scientist, Ph.D.
He received his Ph.D. from the University of Nevada, Reno in the USA in 2004. From 2005-2008 he was a post-doc at the Los Alamos National Laboratory, where he has been a staff member since 2008. Dr. Ulrich's research focuses on experimental methods of imaging and characterizing nonlinear elastic properties in materials, in particular for nondestructive evaluation and geophysical applications.
https://www.researchgate.net/profile/Timothy_Ulrich

Pierre-Yves Le Bas
Los Alamos National Laboratory
MS D446, PO box 1663, Los Alamos NM87545, USA
Research Scientist, Ph.D.
He received his Ph.D. degree from the University of Le Havre in 2004. He was a research and teaching assistant at the University of Le Havre in 2005, and then a postdoctoral fellow at the Katholieke Universiteit Leuven Campus Kortrijk from 2005 to 2007. In 2007 he came at the Los Alamos National Laboratory as a postdoctoral fellow before becoming a research scientist in 2010.
http://www.ees.lanl.gov/ees11/geophysics/nonlinear/nonlinear.shtml

Paul Johnson
Los Alamos National Laboratory
Mail Stop D443, LANL, Los Alamos, New Mexico 87545, USA
Senior technical Staff and Fellow, Ph.D.
He obtained his Doctorate in Physical Acoustics from the Sorbonne (Paris VII), after obtaining an MS degree in Geophysics from the University of Arizona, and a BS degree in Geology from the University of New Mexico (USA). His work has included studies in earthquake triggering, time reversal, general seismology, test ban verification, earthquake strong ground motion and laboratory acoustical studies and has been the head of the nonlinear acoustics team since the late 1980s. He was a professor at the Institute of Physics of the Globe and Paris VI in 2002-2004, 2013-2015.
http://www.lanl.gov/orgs/ees/ees11/geophysics/staff/johnson/johnson.shtml

Sylvain Haupert
Laboratoire d'imagerie biomédicale, CNRS UMR 7371, INSERM U1146, UPMC Paris 6
15 rue de l'école de médecine, 75006 Paris, France
Research Engineer, Ph.D.
He earned his MS degree in biomedical engineering from the University of Technology of Compiegne in France in 2001. In 2006, he joined the CNRS INSERM Biomedical Imaging Laboratory, as an engineer developing instrumentation. He earned his Ph.D. in acoustics from the Paris-Sorbonne University in 2012. He is now interested in nonlinear acoustics methods to detect microdamage in different materials, especially bone.
http://www.labos.upmc.fr/lip/spip.php?article456&lang=en