

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560241

研究課題名（和文） 非線形変調波動場の逆解析による微小損傷定位とモニタリング

研究課題名（英文） Localization and monitoring of incipient damages based on inverse analysis of nonlinear modulated wave field

研究代表者

増田 新 (MASUDA ARATA)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・准教授

研究者番号：90252543

研究成果の概要（和文）：

本研究は、弾性波動場中の接触型損傷部における接触非線形性による波動変調現象に基づき、供用中の構造物に発生した初期段階の微小損傷の位置と損傷度を、構造物に貼付または埋め込んだ圧電素子を用いてリアルタイムに評価可能な、構造物組み込み型の微小損傷検出法の開発を目的とするものである。特に従来の非線形波動変調法および非線形圧電インピーダンス変調法では不可能だった損傷の位置検出に取り組み、損傷位置のセグメンテーション法および位置同定法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

This project aims to develop damage detection methodologies which can identify the location and severity of the incipient structural damages in real time based on the nonlinear wave modulation phenomenon due to the contact acoustic nonlinearity at the damage. Damage segmentation and localization algorithms have been mainly explored by means of surface-bonded piezoelectric wafer sensor arrays and wave separation techniques.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：機械力学、診断

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：非線形、超音波、損傷検出、モニタリング、逆解析

## 1. 研究開始当初の背景

疲労き裂や複合材料の層間剥離など粗い接触を持つ損傷部位においては、界面での応力-ひずみ関係は極めて強い非線形性を示す。近年、接触型損傷部位に固有のこのような非線形性が波動場に与える影響を巧みに利用

したさまざまな微小損傷評価手法が提案されており、通常の超音波なら透過してしまう閉き裂や kissing bond の検出に効果を発揮している。このうち、大振幅の超音波波動の入射によって損傷部の非線形性を顕在化させ、その結果生じる高調波応答や分数調波応

答を用いる方法は「非線形超音波法」と呼ばれており、探触子の走査やアレイ探触子の利用による画像化も試みられている。これらの手法は高い空間分解能が期待できるため非破壊検査手法としての開発が進められているが、一つのセンサがカバーする検査範囲が比較的狭いうえに大振幅の超音波入力が必要とすることから、構造物組み込み型の構造ヘルスマonitoringシステムとしての展開には難がある。

いっぽう、代表者らはこれまでに、粗い接触界面を持つ損傷部位における高周波波動と低周波振動の非線形相互作用による変調現象を利用する「非線形波動変調法」に注目し、新しい高感度損傷モニタリング手法としての研究を行ってきた。非線形波動変調法は、

- 小振幅の高周波波動（プローブ波動）を用いるため構造物に貼付または埋め込んだ圧電素子による実現が容易であり、組み込み型の構造ヘルスマonitoringシステムとしての展開に適している；
- 原理的に健全時のベースラインデータを必要としない；

といった特長を持つ有望な方法である。代表者らは、本手法を電気機械インピーダンス法と組み合わせたセルフセンシング手法である非線形圧電インピーダンス変調法を提案し、単一の圧電素子で微小損傷の有無を判別可能な手法の研究を進めてきた。ただしこれまでの手法では、基本的には損傷の有無と損傷度を判別するのみで損傷位置を知ることができなかったため、同手法に基づいた損傷位置検出手法の開発が課題となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、弾性波動場中の接触型損傷部における非線形変調現象に基づき、供用中の構造物に発生した初期段階の微小損傷の位置と損傷度を、構造物に貼付または埋め込んだ圧電素子を用いてリアルタイムに評価可能な、構造物組み込み型の微小損傷検出手法の開発を目的とするものである。微小損傷に対する高感度な検出手法として従来から提案されている非線形波動変調法および非線形圧電インピーダンス変調法を疲労き裂などの損傷進展監視に適用し有用性を明らかにするとともに、外力推定法などの逆解析の考え方を組み合わせて発展させることを試み、従来の非線形波動変調法では不可能だった損傷の位置判別を可能にしようとするものである。本手法によって、初期段階の微小損傷を高感度に検出可能な構造物組み込み型の損傷モニタリングシステムを開発でき、機械や構造物のライフサイクルコスト低減のための健全性評価および余寿命評価の高精度化に貢献できると期待される。

## 3. 研究の方法

(1) はりを対象として、振動モード解析の観点から基礎的定式化を行う。表面に圧電素子が貼付されたき裂を有する真直はりについて、プローブ周波数の近傍帯域における変調波動場の支配方程式を、曲げ剛性分布に局所的な時間変動成分を導入した偏微分方程式で表現し、これに復調操作（周波数シフト操作）を施した復調波動場の支配方程式を導出する。応答を定常成分と擾乱成分に分解し、高周波数のプローブ波動を入力されたはりに生じる局所的擾乱が周囲に伝播する際のダイナミクスを明らかにする。

(2) 疲労き裂進展監視への非線形圧電インピーダンス変調法の有用性について、特に曲げ疲労試験片における表面き裂進展を対象として損傷指標とき裂寸法との対応付け、さらには残存疲労寿命の予測について実験的な検討を行う。

(3) はりモデルにおける損傷存在箇所のセグメンテーションおよび損傷定位手法の検討を行う。前者においては、はり上にいくつかのセンサアレイを設置し、各アレイで波動成分を分離することによってアレイ間の波動伝達関数を求め、その時変性の有無によって損傷部位のセグメンテーションを行うことを検討する。後者においては、き裂部位を復調波動場の波源と考え、複数点で観測した復調波動信号の相互の位相差に着目し、位相差からき裂位置を逆解析推定する方式を検討する。

## 4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

① モード解析の観点からはりに生じた局所的擾乱が形成する復調波動場の解析を行い、プローブ加振力と復調波動場の関係が Zadeh の時変伝達関数で記述されることに留意して、摂動解法およびフーリエ級数法による近似解を構成した。また、Zadeh の時変伝達関数の現実的な近似表現である凍結近似解の精度について誤差のオーダー評価を行った。

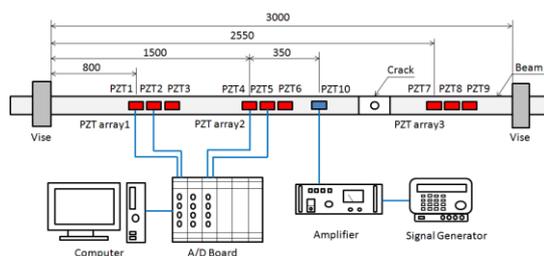


図1 真直はり試験体

② 両端固定された真直はりに圧電素子をアレイ状に貼付した試験体（図 1）を用いて損傷定位手法の検討を行うために、まず試験体の波動伝播特性について調査した。試験体をスイープ加振したところ、モード密度が高い周波数領域と粗な周波数領域があることがわかった。このことは試験体を細長い平板としてモデル化し長手方向に伝播する波動モードの分散特性を導くことによって上手く説明できる。モード密度が高い領域は各次数の波動モードが阻止帯域から通過帯域に遷移する領域であり、また、最低次波動モード（幅方向に節を持たない曲げ波）の分散特性はティモシェンコはりのモデルとよく一致することがわかった。このことは有限要素モデルによる解析結果（図 2）ともよく一致した。さらに、この分散特性を用いてはりを伝播する波動成分の分離を行い、センサアレイで分離した波動成分が上述の波動モデルとよく整合することを示した。

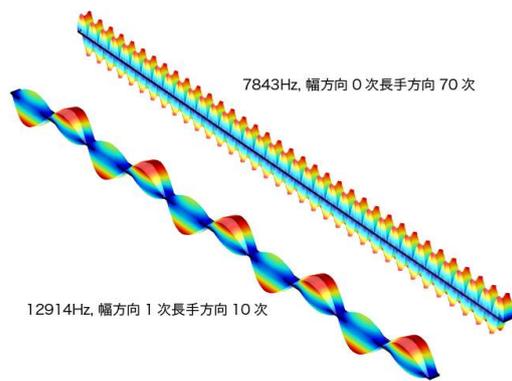


図 2 有限要素モデルによる試験体の解析

③ 図 1 の試験体を用いて変調波動場および復調波動場の挙動を観察した。その際に、はり表面に板小片をボルト締結したものを接触非線形性を有する模擬損傷として用いた。試験体を水平加振機と接続し試験体の 1 次モードおよび 2 次モードでポンプ加振を行い非線形波動変調現象が生じることを確認した。特に模擬損傷部において曲率が極大となる 2 次モードにおいては 10% 以上の変調度を示した。ボルト締め付けトルクを管理することにより再現性も良好であり、非線形波動変調の伝播の研究のための模擬損傷として有効であることがわかった。

④ 変調波動場および復調波動場の挙動を観察する過程で変調観測値のドリフトが問題になり、原因について調査した結果、連続駆動による圧電素子及び接着層の温度上昇によるものと結論づけられた。この温度ドリフトは非線形波動変調法や非線形圧電インピーダンス変調法において長時間の連続プロ

ード駆動を行うときに見られるが、非線形圧電インピーダンス変調法における損傷指標の計算過程である無次元剛性摂動の計算においてこの影響は取り除かれる（図 3）。

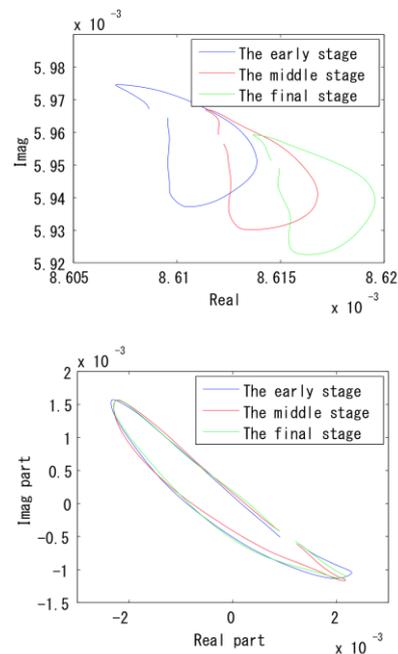


図 3 温度ドリフトの影響（上：圧電素子の瞬時アドミタンス，下：無次元剛性摂動）

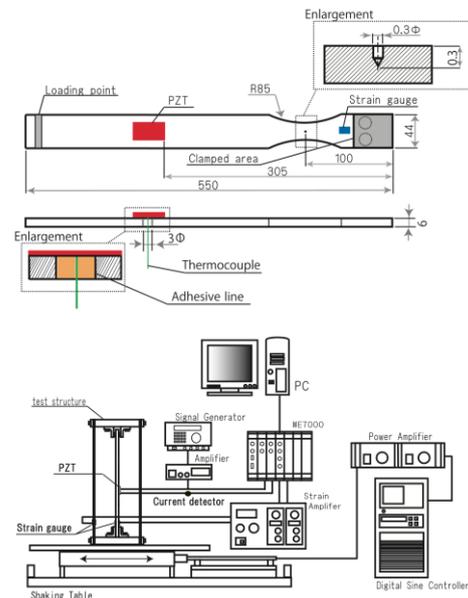


図 4 小穴を有する試験片（上）と実験装置全体図（下）

⑤ 疲労き裂進展監視への非線形圧電インピーダンス変調法の有用性の検討に関して以下の成果を得た。表面に小穴を有するはり試験片に圧電素子を貼付した曲げ疲労実験装置（図 4）により、非線形圧電インピーダンス変調法による損傷進展監視の実験を行い、

損傷指標と表面き裂寸法が高い相関を持つことを示した (図 5). さらに, 損傷指標が応力拡大係数を比例関係にあることを見だし (図 6), Paris 則の適用により残存疲労寿命の予測が可能であることを示した (図 7).

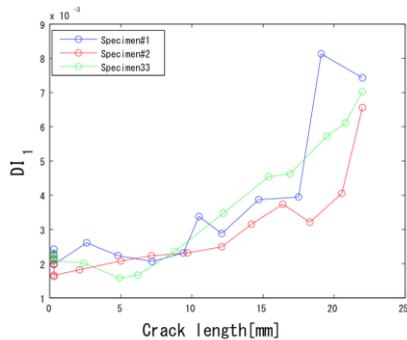


図 5 表面き裂長さと損傷指標

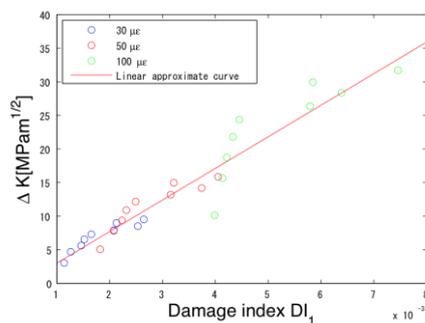


図 6 損傷指標と応力拡大係数

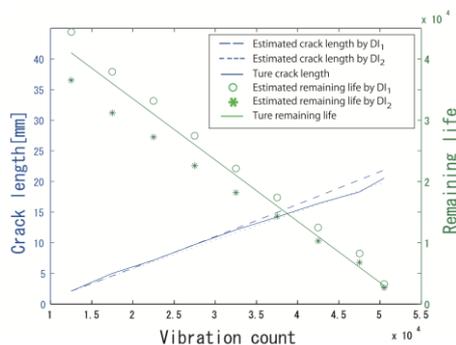


図 7 残存寿命推定 (緑シンボル: 各繰り返し数において推定した残存寿命, 緑実線: 真の残存寿命)

⑥ 図 1 の試験体を用いて損傷部位のセグメンテーション手法の検討を行った. 圧電素子センサアレイを用いてはりを長手方向に伝播するプローブ波動を左向き進行波および右向き進行波に分離すると, 両者の間の関係からセンサアレイから隣接するセンサアレイまでのセグメントにおける波動伝達関数や, センサアレイから左 (右) 境界までのセグメントにおける往復の波動伝達関数を同

定することができる. これらの波動伝達関数は損傷部位を含まないセグメントにおいては時不変であるが, セグメントが損傷部位を含む場合は損傷部での非線形波動変調を受けるためポンプ周期で変動する時変伝達関数となる. 例として中央のセンサアレイ (図 1 の PZT4, 5, 6) で波動分離を行った場合を示す. 図 1 で crack と標記されている部分に模擬損傷が設置されているため, 右側セグメントでの波動伝達関数が時変, 左側は時不変である. 左側領域および右側セグメントでのプローブ周波数における瞬時波動伝達関数の値を求めたものを複素平面上の軌跡として図 7 に示すが, 右側セグメントでの波動伝達関数が大きな軌跡を描いており, この結果より右側セグメント内に損傷が存在すると判定することができる. なおこの手法においてはセンサアレイから離れた場所にプローブ加振を行うための別の圧電素子が必要であり, セルフセンシングではない.

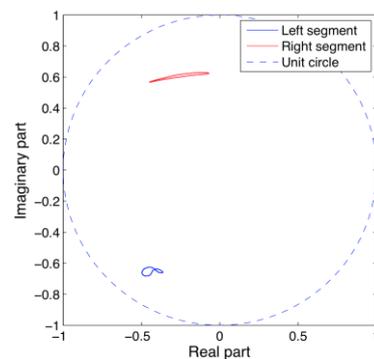


図 8 左右セグメントにおける瞬時波動伝達関数の軌跡

⑦ ⑥の手法と非線形圧電インピーダンス法を組み合わせたセルフセンシング型のセグメンテーション手法について基礎検討を行った. セグメント毎の波動伝達関数の推定式を導出したが実験的検証には未着手である. また当初予定では⑤のき裂進展監視実験への適用を計画していたが実施できていない.

⑧ 図 1 の試験体を用いて損傷部位の位置同定手法の検討を行った. ポンプ加振が正弦波であるとき復調波動場はポンプ周波数およびその高調波の成分を持つが, これらは損傷部由来の成分であり損傷部を波源と見なすことができる. そこでこれらの成分の位相比較により波源探査が可能であると考えた. そこで損傷部の両側二箇所にセンサアレイにおいて各々波動分離を行い, アレイ間領域内に外側から流入する波動成分を除去することによって領域内からの直達波成分を抽出し, 位相比較によって損傷部位を同定した. その結果, センサアレイから損傷位置までの距離を約 20%の誤差で推定することができた.

(2) 成果の評価と今後の展望

き裂進展監視への適用については試験片レベルでは目的を達成することができ、今後実構造物への適用試験が望まれる。損傷部位のセグメンテーションについては肯定的な結果を得ており、継続して有効性の評価を実施するとともにセルフセンシング型手法への展開が期待される。損傷位置の同定においては、精度向上へのさらなる取り組みが必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① A. Masuda, J. Aoki, T. Shinagawa, D. Iba and A. Sone, Nonlinear piezoelectric impedance modulation induced by a contact-type failure and its application in crack monitoring, Smart Materials and Structures, Vol. 20, No. 2, 025021, 2011. (査読あり)  
DOI:10.1088/0964-1726/20/2/025021

[学会発表] (計3件)

- ① 笹原 淳平, 増田 新, 非線形圧電インピーダンス変調法による疲労き裂進展の検知, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011 CD-ROM 論文集, No. 153, pp. 1-7, 2011.  
② 増田 新, 青木 淳祐, 笹原 淳平, 非線形電気機械インピーダンス変調法-き裂

を有するはりのモデル化と解析, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2010 CD-ROM 論文集, No. 450, pp. 1-6, 2010.

- ③ A. Masuda, J. Aoki, D. Iba and A. Sone, Detection and localization of contact-type damages via nonlinear impedance modulation of piezoelectric materials bonded on a beam structure, Proceedings of SPIE, Vol. 7650, 765034, 2010/3/11, San Diego.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 新 (MASUDA ARATA)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：90252543

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：